



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Analisi critica di concetti di reattori evolutivi PWR di piccola taglia
ed identificazione di aree di potenziale miglioramento

Doc. CIRTEN-UNIROMA1 RL 1160/2010

R. Genovese, L. Gramiccia, A. Naviglio, D. Vitale Di Maio



ANALISI CRITICA DI CONCETTI DI REATTORI EVOLUTIVI PWR DI PICCOLA TAGLIA ED
IDENTIFICAZIONE DI AREE DI POTENZIALE MIGLIORAMENTO

R. Genovese, L. Gramiccia, A. Naviglio, D. Vitale Di Maio (CIRTEN)

Settembre 2010

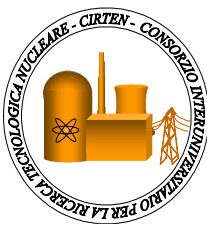
Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



CIRTEN
CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO
PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE

UNIVERSITA' DI ROMA 1

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ASTRONAUTICA, ELETTRICA ED ENERGETICA

**ANALISI CRITICA DI CONCETTI DI REATTORI EVOLUTIVI PWR DI
PICCOLA TAGLIA ED IDENTIFICAZIONE DI AREE DI POTENZIALE
MIGLIORAMENTO**

CIRTEN-UNIROMA1 RL 1160/2010

AUTORI

Ing. R. Genovese

Ing. L. Gramiccia

Prof. A. Naviglio

Ing. D. Vitale Di Maio

ROMA, LUGLIO 2010

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP5 punto A1 - AdP ENEA MSE del 21/06/07
Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fissione”.

INTRODUZIONE SUGLI IMPIANTI NUCLEARI EVOLUTI

Gli impianti di progettazione evolutiva (“evolutionary design”) sono caratterizzati da un design avanzato che si basa essenzialmente sul progetto di impianti già esistenti ma dai quali si discosta per determinate modifiche apportate al progetto stesso. Per poter essere definito evolutivo, il progetto deve avere caratteristiche prevalentemente analoghe ad impianti già esistenti e presentare determinati miglioramenti ottenuti attraverso limitate modifiche del progetto stesso. In particolare, si vuole mantenere invariata la struttura principale del progetto al fine di minimizzare i rischi tecnologici che possono risultare da un impianto totalmente nuovo. Lo sviluppo di un progetto evolutivo richiede, come conseguenza ultima, un grande sforzo in termini di test a livello ingegneristico, finalizzati a confermare l'effettiva utilità della modifica apportata.

In questo ambito rientrano i reattori di piccola e media taglia¹ (SMRs – Small and Medium Reactors) di tipologia ad acqua pressurizzata (PWR – Pressurized Water Reactor) che, sfruttando l'esperienza pluridecennale degli impianti PWR ancora oggi in esercizio e al fine di rendere “accessibile” ad un maggior numero di paesi la produzione di energia elettrica da fonte nucleare, sono stati sviluppati con delle caratteristiche nuove rispetto alle soluzioni tradizionali.

Nello specifico si riporteranno, come casi studio, una serie di impianti sviluppati a livello internazionale caratterizzati da progetti con differenti livelli di sviluppo (da alcuni in fase di studio concettuale fino ad altri, più avanzati, che sono stati già costruiti). Partendo dal progetto di un impianto PWR di taglia tradizionale (circa 1000 MWe) le modifiche che vengono prevalentemente effettuate sono relative ai sistemi di generazione del vapore, di movimentazione delle barre di controllo e di circolazione del refrigerante primario. Ciò che accomuna tutti gli impianti di piccola taglia è l'impiego di una struttura di tipo integrata in cui sono compresi tutti i componenti che generalmente compongono il circuito primario (loop comprensivi di pompe di circolazione, generatori di vapore e pressurizzatore).

Il crescente interesse, che recentemente si è osservato, per i reattori nucleari di piccola e media taglia ha portato allo sviluppo di numerose soluzioni che potrebbero consentire di avere, nell'arco di un decennio, una produzione di energia elettrica da fonte nucleare anche al di fuori dei grandi sistemi di distribuzione dell'energia elettrica. Gli SMR potranno essere utilizzati per la produzione di energia elettrica e calore necessari per coprire i fabbisogni di piccoli villaggi, situati in zone remote, e per produrre acqua potabile attraverso processi di dissalazione che sfruttano il calore prodotto dagli stessi reattori nucleari.

Un'idea del reale interesse applicativo che tali impianti stanno riscuotendo è dato dal fatto che la società russa Energoatom sta attualmente costruendo il primo di una serie di impianti nucleari installati su piattaforme galleggianti. Queste, equipaggiate con due reattori nucleari di piccola taglia, ciascuno da 35 MWe, verranno utilizzate in aree remote. Oltre alle zone remote limitrofe alle coste, esiste la possibilità che possa svilupparsi un ulteriore mercato rappresentato dalle piattaforme off-shore utilizzate per l'estrazione del petrolio e del gas. Risulta evidente come gli impianti nucleari di piccola taglia potranno svilupparsi per interessare una parte di mercato ancora non di competenza degli impianti nucleari (con riferimento a quelli di taglia tradizionale). La disponibilità di varie taglie di reattori nucleari, molto diverse tra loro, rende possibile occupare diverse fette di mercato risultando molto versatili e soprattutto competitivi con diverse tecnologie concorrenti.

Gli impianti nucleari di taglia tradizionale, per la produzione di energia elettrica, godono di un grande beneficio dovuto all'economia di scala, quindi, la costruzione di un impianto con SMR potrebbe non risultare attrattiva. L'interesse di numerosi paesi, per questo tipo di impianti, è necessariamente indice di vantaggi legati alla costruzione degli stessi. Da un lato, la riduzione della taglia comporta una perdita dovuta all'economia di scala, dall'altro gli SMR hanno diverse caratteristiche che li rendono molto interessanti rispetto ad impianti di taglia tradizionale.

Le caratteristiche più importanti, che si analizzeranno in maniera più dettagliata, sono riportate di seguito:

- Prevedibile produzione in serie dopo la costruzione delle prime unità;
- Riduzione del costo capitale e quindi del rischio finanziario associato;
- Riduzione del tempo necessario per la costruzione;

¹ Si definiscono impianti di piccola taglia gli impianti caratterizzati da una potenza elettrica all'output inferiore a 300 MWe e impianti di media taglia quelli al di sotto di 700 MWe.

- Possibilità di incrementare la potenza nel tempo grazie all'installazione di altre unità nello stesso sito (possibile grazie alle caratteristiche di modularità);
- Riduzione del numero dei sistemi ausiliari;
- Aumento della capacità di non proliferazione.

PRODUZIONE IN SERIE SU GRANDE SCALA

I reattori nucleari di piccola taglia, caratterizzati da dimensioni ridotte rispetto ai tradizionali reattori, potranno essere costruiti in industrie di medie dimensioni. Questa caratteristica, che permette di avere a disposizione numerose industrie, in altrettanti paesi del mondo, in grado di rispondere alla richiesta di specifici componenti, consente di ottenere una riduzione dei tempi e dei costi legati al trasporto degli stessi. Il recipiente in pressione (RPV – Reactor Pressure Vessel) dei reattori integrati di piccola taglia, caratterizzato dal circuito primario completamente incluso nello stesso, può essere pre-assemblato negli impianti industriali al fine di ottenere una drastica riduzione dei tempi di messa in opera. Il RPV, oltre a tutti gli altri componenti che caratterizzano l'impianto, è modulare e semplice da trasportare. Inoltre, se il RPV, comprensivo del circuito primario e di tutti gli internals, viene assemblato nelle industrie, dallo stesso costruttore, gli standard di sicurezza risulteranno più elevati ed i costi maggiormente prevedibili e limitabili.

L'andamento caratteristico del costo capitale rispetto alla potenza installata è riportato nel diagramma di seguito (Fig. 1).

Tale diagramma consente di evidenziare come gli SMR siano in grado di recuperare la perdita di economicità, legata alle ridotte dimensioni, tramite particolari specifiche che caratterizzano questa tipologia di reattori nucleari.

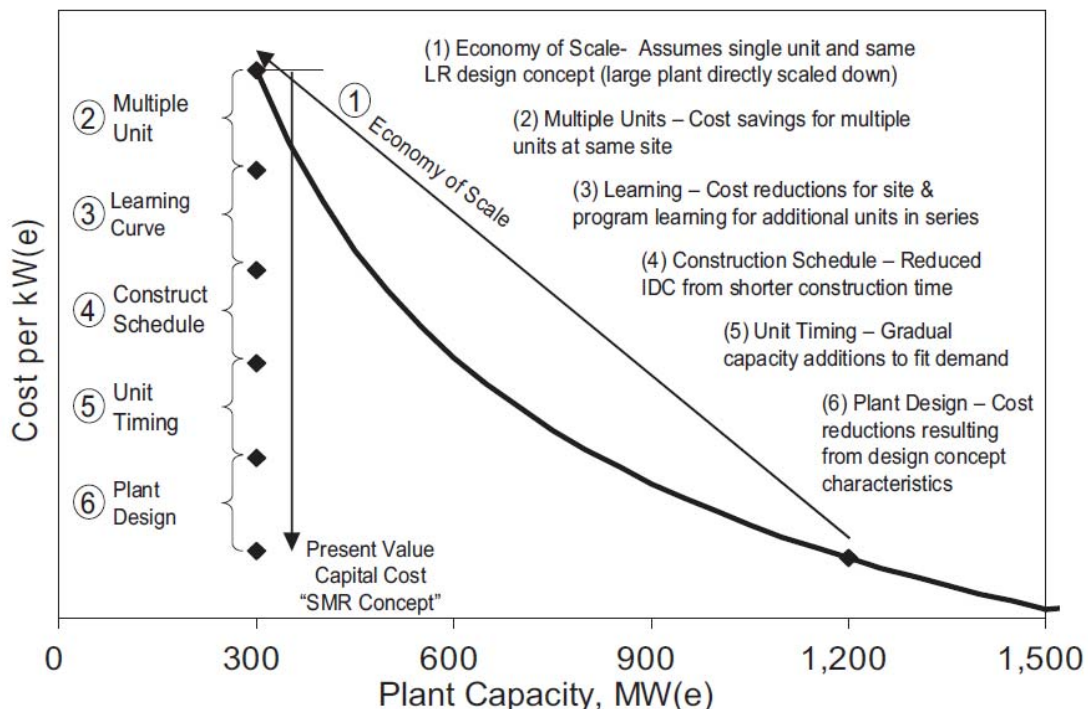


Fig. 1. Andamento del costo unitario del kW(e) installato all'aumentare della potenza installata nell'impianto.

ARCHITETTURA MODULARE

Generalmente diversi reattori nucleari sono costruiti nella stessa area con l'obiettivo di ottenere vantaggi economici generati dalle concessioni per il licensing, dai sistemi ausiliari e dalle infrastrutture già preesistenti. È importante sottolineare che SMR è una definizione che si riferisce alla taglia del singolo reattore nucleare, nello stesso impianto di produzione è possibile avere una potenza installata analoga a quella tradizionalmente ottenuta con unità di grande taglia.

Un reattore nucleare di piccola taglia può essere preferito ad uno tradizionale per il ridotto costo capitale che lo caratterizza e per l'architettura modulare, caratteristiche grazie alle quali è possibile costruire diverse unità scaglionate nel tempo ed ottenere un flusso di cassa meno negativo rispetto ad un impianto di grande taglia. Inoltre, nuove unità possono essere costruite per aumentare la capacità della griglia dal momento che un singolo reattore di piccola taglia rappresenta una quota parte limitata della complessiva potenza installata sulla rete locale.

Diversi reattori nucleari di piccola e media taglia sono attualmente in fase di sviluppo nel mondo, in particolare viene dichiarata la possibilità di costruire fino a 24 unità nello stesso sito². Ognuno di questi reattori può essere monitorato attraverso la medesima sala di controllo grazie alla struttura (Fig. 2) prevista già durante la fase progettuale.

Dal momento che la sala controllo e diversi altri sistemi sono già stati costruiti in concomitanza con il primo reattore nucleare installato nell'impianto, il costo capitale ed il tempo di posa in opera della prima unità sono necessariamente superiori a quelli delle successive.

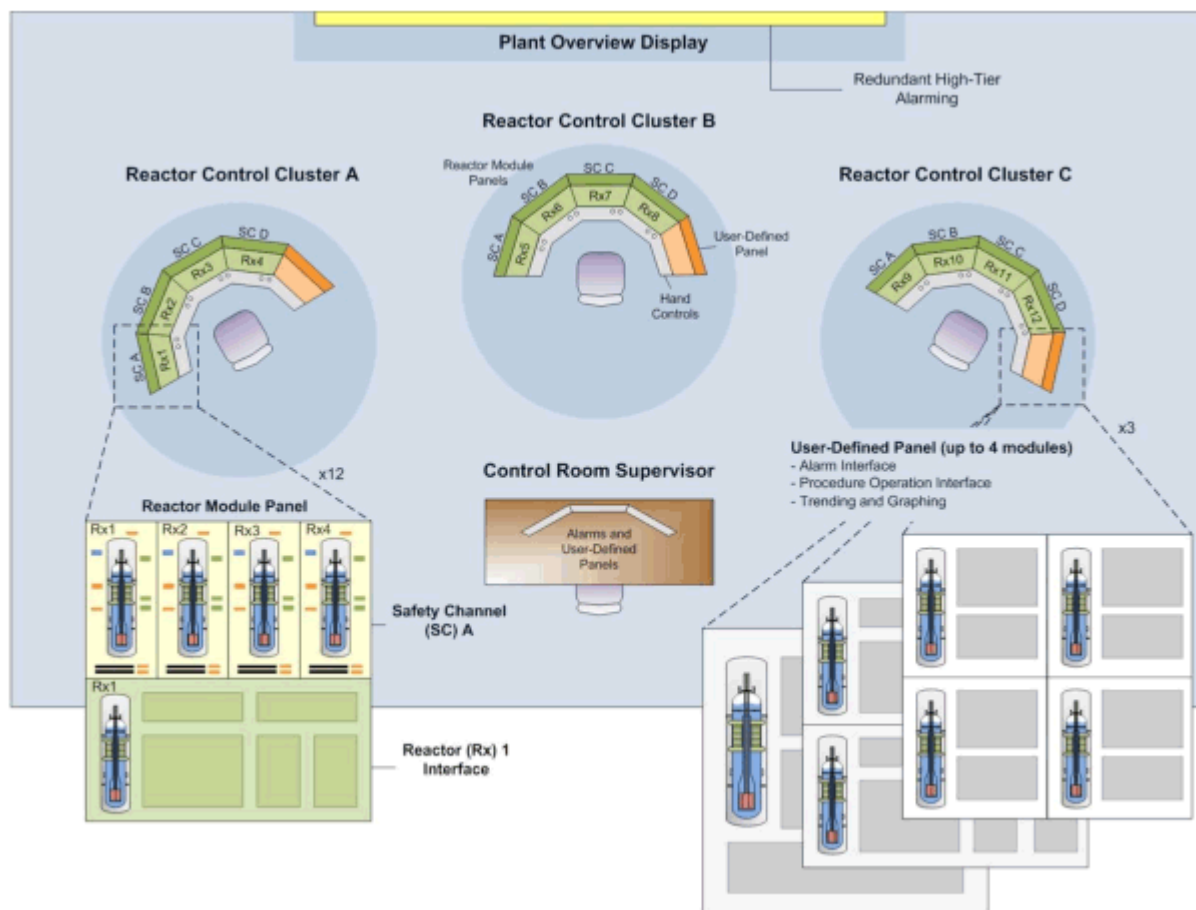


Fig. 2. Sala di controllo del reattore modulare NuScale.

L'economia legata alla taglia, persa in questi piccoli reattori, è recuperata attraverso la produzione in serie degli stessi. La produzione in serie consente di ottenere un'importante riduzione del tempo di realizzazione e messa in opera. Come esempio si riporta una stima relativa all'impianto IRIS (International Reactor

² Si fa qui riferimento ad un impianto in cui sia prevista l'installazione di reattori NuScale (non esaminati nel presente documento).

Innovative and Secure) per il quale si prevede un tempo di costruzione di tre anni³ per la prima unità e la riduzione a due anni per la costruzione delle unità successive. Tale stima, con opportune osservazioni, può essere riportata agli altri reattori nucleari di piccola taglia.

L'architettura modulare consente di costruire, nello stesso sito, nuovi reattori nucleari di taglia analoga a quelli già presenti mentre le unità già costruite continuano ad esercire. La potenza installata nell'intero impianto attraverso molti reattori di piccola taglia può essere simile o minore della potenza installata con una singola unità tradizionale.

Quando la costruzione di un'unità è completata, e produce energia elettrica, genera un cash-flow positivo e la costruzione di una seconda unità può essere avviata. Secondo la Westinghouse la costruzione di tre unità IRIS ad intervalli di tre anni, finanziati al 10% per dieci anni, genererebbe un flusso negativo di cassa al massimo di 700 M\$, circa tre volte inferiore rispetto a quello che verrebbe generato da una singola unità da 1000 MWe. Come conseguenza, nei paesi in via di sviluppo, i reattori modulari di piccola taglia potrebbero essere l'unica possibilità per avere una produzione elettrica da fonte elettronucleare, non solo per le ridotte dimensioni della rete elettrica che non può supportare 1000 MWe prodotti da una singola unità, ma anche per una motivazione di tipo economica.

SISTEMI A SICUREZZA PASSIVA O INTRINSECA

I reattori nucleari di piccola taglia sono progettati per avere caratteristiche tali da ridurre i costi di costruzione. La migliore soluzione che può garantire questi benefici è la struttura integrata del primario in cui sono incluse le pompe di circolazione ed i componenti per il trasferimento del calore⁴. Grazie alla struttura, di tipo integrata, è possibile ottenere una riduzione dei costi grazie ai processi costruttivi, che risulteranno più semplici, e alla possibilità di impiego di sistemi di sicurezza passivi o intrinseci, che richiedono un numero ridotto di componenti.

La caratteristica più importante dei sistemi di sicurezza, passivi o intrinseci, è l'aumento del livello di sicurezza che va a caratterizzare l'intero impianto. Questo fattore ha, in termini di sicurezza, una grande importanza poiché, con una prevedibile vasta diffusione dei reattori nucleari di piccola taglia, un evento

estremamente raro (es. $10^{-8} \cdot \frac{\text{eventi}}{(\text{reattore} \cdot \text{anno})}$) potrebbe risultare molto più probabile che non nel passato

dove solo un numero limitato di impianti era in esercizio (da notare la riduzione della probabilità di accadimento di eventi incidentali costantemente perseguita nei progetti più moderni).

Nel seguito si analizzeranno alcuni impianti nucleari di piccola taglia dei quali si vogliono evidenziare pregi e difetti, nonché eventuali punti interessanti che presentano la possibilità di poter essere ulteriormente sviluppati. In questa analisi si vuole identificare l'efficacia dei sistemi di sicurezza previsti per lo svolgimento delle diverse funzioni richieste, necessarie per il corretto funzionamento di un impianto nucleare nelle diverse condizioni di impianto.

Nel corso dell'analisi dei diversi impianti di questa tipologia al fine di poter avere un comune elemento di paragone, si farà spesso riferimento all'impianto MARS. L'impianto MARS (Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe), da 600 MWth di tecnologia ad acqua pressurizzata, è stato sviluppato a partire dai primi anni 80 presso l'Università "La Sapienza" di Roma. Tale impianto è stato il primo, di questa tipologia, ad essere presentato a livello internazionale, e ad essere caratterizzato dall'impiego di sistemi passivi e/o intrinsecamente sicuri. In questo contesto si utilizzerà spesso l'impianto MARS come confronto, al fine di rendere più agevole al lettore la comprensione di sistemi adottati in impianti spesso non conosciuti.

A questo proposito si riporta di seguito un semplice esempio esplicativo riguardante la particolare soluzione adottata nell'impianto MARS per il sistema di spegnimento secondario del reattore (SSS – Secondary Shutdown System). In genere, accoppiato al sistema di spegnimento primario (FSS – First Shutdown System) è previsto un sistema idraulico in grado di iniettare acqua fortemente borata all'interno del

³ AREVA in un primo momento ha ipotizzato, per la costruzione dell'impianto EPR Olkiluoto 3, un tempo di costruzione di circa quattro anni e mezzo con l'inizio delle operazioni commerciali nel 2009, diversi eventi hanno causato un ritardo nella costruzione e l'avviamento è attualmente previsto per il 2012.

⁴ I componenti per il trasferimento di calore o generatori di vapore sono considerati dal momento che l'analisi è fatta sui reattori nucleari di tipo PWR.

refrigerante primario al fine di portare il reattore in condizioni di sottocriticità, ottenendo quindi lo spegnimento dello stesso. In una configurazione di questo tipo si ha la possibilità di fallimento, seppur con probabilità evanescenti, sia del primo che del secondo sistema di spegnimento richiedendo entrambi sistemi un'alimentazione esterna. Nell'impianto MARS, invece, è presente solo la probabilità di fallimento del primo sistema di spegnimento dal momento che il sistema di spegnimento secondario è comandato da leggi fisiche ineludibili e pertanto da una probabilità di fallimento pressoché nulla. Si devono comunque tenere in considerazione gli elementi che, seppur non facenti parte del sistema, possono inficiarne l'efficacia, si consideri ad esempio la possibilità che un evento incidentale possa aver deformato i tubi guida in cui le stesse barre di controllo devono iscriversi. Nel MARS, il FSS, è accoppiato ad un sistema che basa il suo funzionamento sulla dilatazione termica differenziale di due metalli caratterizzati da differenti coefficienti di dilatazione termica. Nel momento in cui la temperatura media del refrigerante primario, all'uscita del nocciolo, raggiunge una soglia prefissata, stabilita in sede progettuale attraverso la scelta dei materiali, la differente dilatazione termica avutasi tra i due metalli causa lo sgancio delle barre di controllo che si inseriscono all'interno del nocciolo garantendone lo spegnimento.

L'impiego dei sistemi di sicurezza, intrinsecamente sicuri, consente di avere una riduzione della complessità dell'impianto. Nel caso appena mostrato è possibile non prevedere il sistema di iniezione dell'acqua borata convenzionalmente utilizzato come soluzione di backup limitando il numero di componenti necessari.

SALVAGUARDIE FINALIZZATE AL RAGGIUNGIMENTO DELLE CARATTERISTICHE DI NON PROLIFERAZIONE NUCLEARE

Lo sviluppo di impianti nucleari di piccola e media taglia, che sono adatti per sistemi di potenza caratterizzati da una rete di distribuzione anche scarsamente sviluppata, deve prevedere salvaguardie che possano prevenire la proliferazione nucleare, poiché, paesi che possiedono un sistema di distribuzione poco sviluppato, e quindi un sistema economico scarsamente basato su industria e terziario, sono spesso caratterizzati da politiche nazionali instabili.

La comunità internazionale vuole evitare che questi paesi possano gestire autonomamente l'intero ciclo del combustibile e per tale ragione sono previste, negli impianti di piccola taglia, una o più delle caratteristiche elencate di seguito:

- Nocciolo "once-through".
- Processi di ricarica del combustibile effettuati in appositi siti, diversi dall'impianto di produzione e comunque di proprietà del fornitore.
- Tempo di vita del nocciolo uguale a quello del reattore.

Nella soluzione con ciclo di irraggiamento del combustibile di tipo "once-through", una volta raggiunto il burn-up di progetto, il nocciolo viene completamente sostituito in un'unica fase; questo consente di ridurre i tempi di fermo impianto e di monitorare più agevolmente il quantitativo di combustibile presente nell'impianto stesso.

La possibilità di prevedere il refueling in appositi siti, lontano dall'impianto di produzione, è possibile nella soluzione prevista dai russi in cui si prevede l'installazione degli impianti nucleari su piattaforme galleggianti. Al raggiungimento della resa energetica voluta, una nuova piattaforma galleggiante con combustibile fresco viene portata sul sito per essere messa in esercizio in sostituzione di quella con il combustibile esaurito; quest'ultima è quindi trasportata in appositi impianti, di proprietà del fornitore, in cui vengono effettuate le operazioni di refueling ed i controlli periodici sull'impianto. Con questa soluzione, il tempo di fermo della produzione si riduce enormemente, con fattori di utilizzo prossimi all'unità, e nella zona in prossimità dell'impianto nucleare non è mai necessario avere del combustibile oltre a quello presente all'interno del reattore.

La soluzione che prevede un nocciolo con tempi di vita simili a quelli dell'impianto (ipotesi di 30 anni) consente di avere vantaggi analoghi alla soluzione precedente poiché non è necessario avere combustibile aggiuntivo, oltre a quello del nocciolo, nella zona dell'impianto. Tutte le operazioni relative alla rimozione del combustibile esaurito vengono fatte in concomitanza con il decommissioning dell'impianto.

ANALISI DELLE PRINCIPALI SOLUZIONI DI IMPIANTI PWR DI PICCOLA TAGLIA PROPOSTE A LIVELLO INTERNAZIONALE

Attualmente nel mondo si stanno portando contemporaneamente avanti diversi progetti di reattori ad acqua pressurizzata di piccola taglia⁵, ciascuno con caratteristiche particolari. Nello studio comparativo che si andrà ad effettuare, sarà necessario tenere in considerazione il periodo in cui il progetto ha preso vita, il budget ad esso dedicato e gli obiettivi prefissati. Con queste discriminanti sarà possibile inquadrare meglio il contesto notando come un reattore che abbia obiettivi di commercializzazione a breve termine presenta spesso soluzioni meno innovative rispetto ad altri che hanno invece minori pretese riguardo la commercializzazione. Di seguito verranno presentati alcuni impianti di cui si indicherà, per ciascuno, l'inizio del progetto, gli obiettivi e lo stato attuale; si riporta di seguito una tabella riepilogativa degli impianti che si sono esaminati.

Tab. 1. Tabella riassuntiva degli impianti che sono stati analizzati

	Nazione	Potenza	Inizio progetto	Stato attuale	Prevista commercializzazione
	[-]	MW _{th} (MW _e)	[anno]	[-]	[anno]
CAREM	Argentina	100 (27)	1984	Disegno dettagliato	Dopo 2015
MRX	Giappone	100	Fine '90	Disegno concettuale	-
PSRD	Giappone	300 (95)	Sviluppo soluzione MRX	Disegno concettuale	-
IRIS	Internazionale	1000 (335)	1999	Certificazione progetto USA stato di pre-application	Dopo 2015
KLT-40C	Russia	150 (35)	Sviluppo di soluzioni esistenti	In costruzione	Pronta prima metà 2012 in produzione fine 2012
SMART	Corea	330 (90)	1996	Disegno concettuale, licensing entro 2012 Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.	Dopo 2015

Le presentazioni dei diversi impianti saranno caratterizzate da una descrizione generale, seguita dalla descrizione di alcuni componenti caratteristici, evoluzione di soluzioni precedenti, o semplicemente di sistemi rappresentativi dell'impianto stesso. Inoltre si analizzeranno, per gli impianti di cui sono disponibili sufficienti informazioni, le caratteristiche relative a sistemi di sicurezza che consentano di rispondere ad eventuali eventi incidentali (eventualmente anche BDBA).

⁵ Caso particolare è quello dell'impianto IRIS che pur non rientrando nel range dei reattori di piccola taglia (potenza elettrica all'output pari a 335 MWe) presenta delle caratteristiche interessanti che vale la pena di esaminare.

MARS

DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

L'impianto MARS, studiato presso l'Università di Roma "La Sapienza", è stato sviluppato in un'ottica di utilizzo dello stesso per la produzione di energia elettrica e calore. La particolarità di tale impianto sta nell'aver massimizzato l'impiego di sistemi di sicurezza passivi al fine di portare a valori prossimi allo zero le probabilità di accadimento di alcune sequenze incidentali⁶. Tale approccio, risultato decisamente differente rispetto agli standard, è poi stato utilizzato in anni più recenti anche nella progettazione di altri impianti nucleari (non esclusivamente di taglia ridotta⁷).

Tab. 2. Caratteristiche principali dell'impianto

Tipo di Reattore	PWR
Potenza [MWth]	600
Tipologia di raffreddamento	Circolazione forzata
Volume interno al RPV [m ³]	130
Portata primaria [kg/s]	3227
Numero SG - tipologia	1 – Ricircolazione
Pressione di esercizio [MPa]	7.5
Temperatura ingresso/uscita [K]	487 / 527
Pressione secondario [MPa]	1.88
Temperatura alimento secondario [K]	423
Temperatura minima vapore [K]	482

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE PRIMARIO E CONTENIMENTO IN PRESSIONE (CPP)

Il sistema di refrigerazione primario è derivato dalla tipica geometria degli impianti PWR ed è dotato di un solo loop di circolazione su cui sono presenti il generatore di vapore e la pompa di circolazione.

Una caratteristica molto importante dell'impianto MARS è di prevedere un sistema (CPP) esterno al RPV e al loop primario, riempito con acqua fredda in pressione (pressione prossima a quella di funzionamento del primario), in cui sono contenuti tutti i componenti del circuito primario. Questo sistema ha lo scopo di rendere non prevedibili gli eventi di LOCA. Durante il normale funzionamento il RPV e le tubazioni del loop, che caratterizzano il confine in pressione del circuito primario, lavorano in assenza di sollecitazioni poiché si trovano a separare due ambienti in cui vige la medesima pressione. In caso di fallimento del confine primario, l'acqua presente all'interno del vessel e quella del CPP si trovano in comunicazione e, stando alla stessa pressione non si ha comunque l'evento di LOCA⁸. Da notare inoltre i vantaggi derivanti dalla presenza dell'acqua a bassa entalpia che, in caso di fallimento della tenuta esterna (CPP) non caratterizza un problema al fine della pressurizzazione dell'edificio di contenimento.

PRIMO SISTEMA DI SPEGNIMENTO

Il sistema di movimentazione delle barre di controllo utilizzato nell'impianto MARS è del tipo utilizzato negli impianti PWR tradizionali (tipologia del meccanismo guida elettromagnetico). L'elevata affidabilità del sistema è pertanto dovuta all'enorme esperienza applicativa avuta su questi sistemi. La testa superiore del vessel, non prevedendo accorgimenti particolari per i meccanismi di movimentazione delle barre di controllo, è caratterizzata da una serie di penetrazioni che, come negli impianti PWR tradizionali, potrebbero dar luogo

⁶ È importante contestualizzare storicamente l'impianto che si è trovato ad affrontare problemi legati alla sicurezza passiva mentre gli altri impianti basavano la loro affidabilità esclusivamente sulla ridondanza

⁷ Si veda come esempio l'approccio dell'impianto AP1000 che si basa fortemente sull'impiego di sistemi passivi piuttosto che sull'esclusivo utilizzo del criterio di progetto della ridondanza di sistemi attivi.

⁸ L'unica possibilità di avere un evento di LOCA è legata alla rottura della tubazione del sistema CVCS, all'esterno del contenimento in pressione, e pertanto il sistema che connette il primario al CVCS è dotato di 4 valvole in serie per l'intercettazione della linea in caso di rottura.

all'espulsione di una barra di controllo qualora si avesse la rottura della tenuta. A rendere impossibile questo evento, nell'impianto MARS, è il sistema di contenimento, con acqua fredda in pressione, che racchiude le tenute dei meccanismi di movimentazione delle barre di controllo, facendo lavorare le stesse, così come l'intero vessel, in assenza di sollecitazioni generalmente presenti a causa delle diverse pressioni vigenti all'interno e all'esterno del vessel.

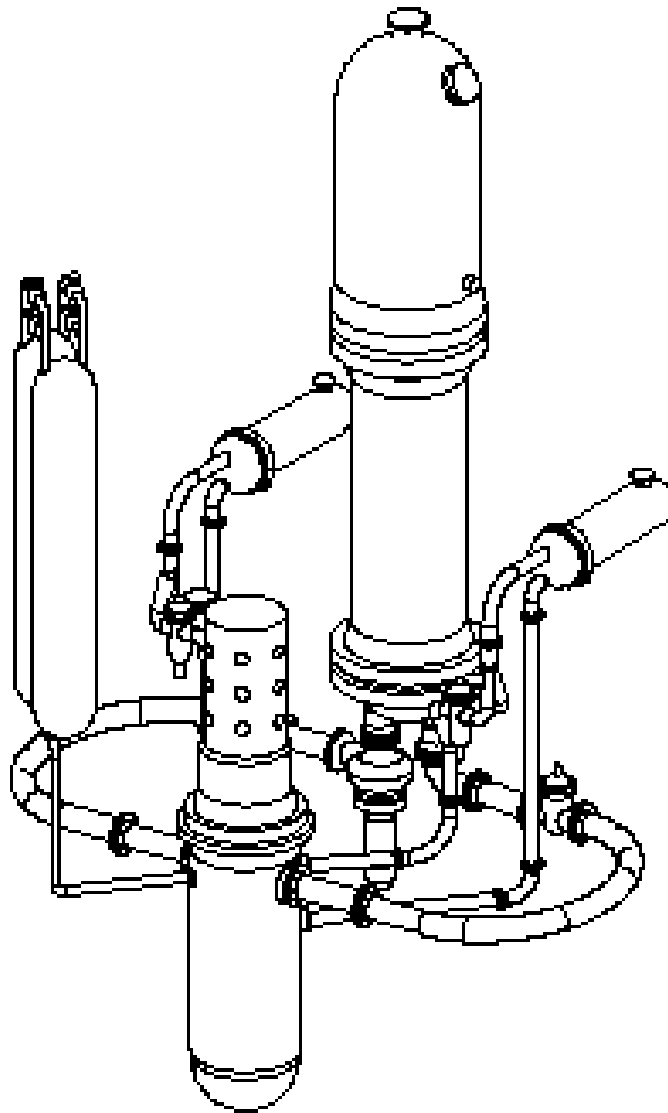


Fig. 3. Layout impianto MARS (circuito primario)

SECONDO SISTEMA DI SPEGNIMENTO DEL REATTORE (SSS)

Il sistema di spegnimento secondario, previsto opzionalmente nell'impianto MARS, è costituito da un meccanismo caratterizzato da ganci di tenuta per banchi di barre di sicurezza costituito da diversi materiali metallici. In particolare si richiede che i materiali che costituiscono tale sistema siano caratterizzati da differenti coefficienti di dilatazione termica.

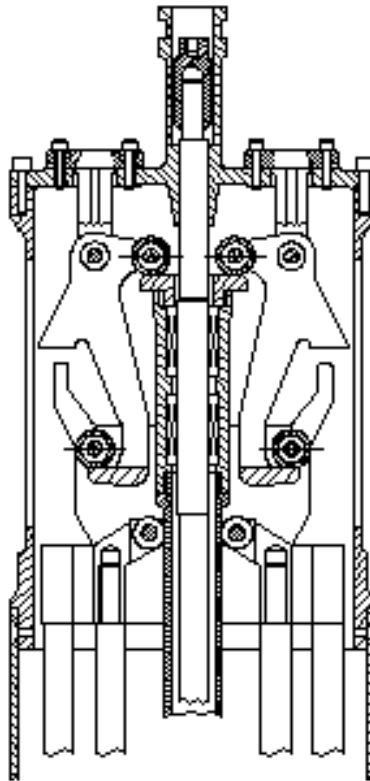


Fig. 4. Sistema di tenuta delle barre di sicurezza dell'impianto MARS

Il sistema è costituito da due cilindri concentrici vincolati assieme ad un'estremità che, a seguito di un aumento della temperatura media del refrigerante primario in uscita dal nocciolo, in cui essi sono immersi, si dilatano in maniera differenziale. Tale allungamento provoca uno spostamento dei ganci di tenuta delle barre di sicurezza, le quali, non più sostenute, cadono per gravità nel nocciolo provocandone l'arresto.

SISTEMA DI RIMOZIONE DEL CALORE DI DECADIMENTO RESIDUO

Una caratteristica molto importante dell'impianto MARS che, assieme al sistema di contenimento in pressione e al sistema di spegnimento secondario, rappresenta il progetto del reattore è il sistema ECCS (tale sistema nell'impianto MARS è denominato SCCS – Safety Core Cooling System) per l'asportazione del calore di decadimento prodotto all'interno del nocciolo in condizioni di emergenza.

Il funzionamento del sistema, così come l'avviamento, avviene grazie a valvole passive di non ritorno, appositamente sviluppate per questo impianto, disposte sul ramo di ritorno del sistema SCCS. Durante il normale funzionamento, grazie alla prevalenza fornita dalla pompa di circolazione primaria, la valvola di non ritorno è mantenuta in posizione di chiusura; in caso di mancanza di alimentazione, e quindi di prevalenza motrice fornita dalla pompa (anche a seguito di un evento di station black out), l'otturatore della valvola si apre mettendo in comunicazione un apposito scambiatore di calore con il refrigerante primario in uscita dal nocciolo.

Il sistema di refrigerazione di emergenza dell'impianto MARS è caratterizzato da tre circuiti in serie, sigillati, che consentono di rilasciare il calore di decadimento prodotto nel nocciolo all'atmosfera esterna. Tali circuiti sono:

- Quello più interno, in cui fluisce il refrigerante primario, è caratterizzato dalla presenza delle valvole di non ritorno passive (in parallelo sono presenti anche delle valvole attive di cui sono note e garantite le prestazioni).
- Un circuito intermedio per connettere termicamente il refrigerante primario con l'ultimo circuito.
- Il circuito più esterno dotato di una piscina atmosferica in cui l'acqua presente nella stessa si porta in condizioni di ebollizione e di un condensatore in cui il vapore prodotto all'interno della piscina stessa viene fatto condensare prima di essere riportato alla piscina.

Uno schema di questo circuito, tipico dell'impianto MARS, è riportato di seguito.

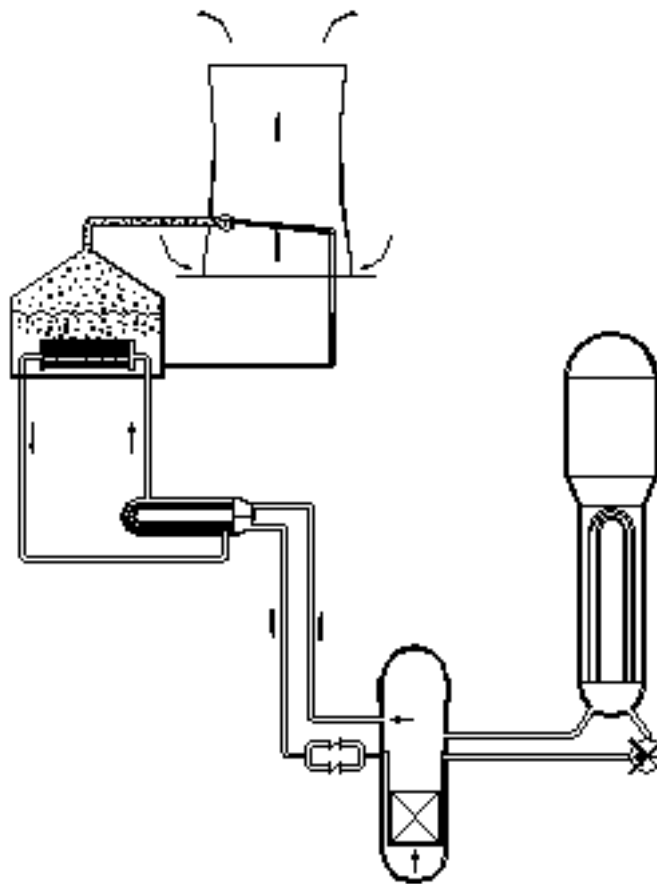


Fig. 5. Schema di funzionamento del sistema di asportazione del calore di decadimento in condizioni di emergenza

GENERATORI DI VAPORE

Il generatore di vapore, utilizzato nell'impianto MARS, è un tipico generatore tubi e mantello di tipologia Westinghouse in cui il refrigerante primario defluisce lato interno tubi, mentre il secondario si trova lato mantello.

A differenza degli altri impianti che si sono analizzati nel presente documento, in cui la soluzione più utilizzata riguarda generatori di vapore di tipologia once-through e produzione di vapore surriscaldato, nell'impianto MARS il vapore prodotto è saturo. Per avere la produzione di vapore saturo secco la corrente prodotta viene fatta confluire in appositi sistemi (separatori a ciclone ed essiccatori) in cui la componente liquida in sospensione viene separata e fatta riciclare nello stesso SG. Per l'impianto MARS si è utilizzato un generatore di vapore di taglia convenzionale ottenendo delle buone caratteristiche di inerzia termica garantite dal grande quantitativo di acqua presente lato secondario. Il layout dell'impianto mostra come nella soluzione progettuale adottata per l'impianto MARS si sia scelto di utilizzare un solo loop di circolazione ed un singolo generatore di vapore associato allo stesso loop.

CAREM (ARGENTINA)

DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

L'impiego per cui è stato concepito l'impianto CAREM, sviluppato in Argentina, è la cogenerazione di energia elettrica e di calore necessario alla produzione di acqua potabile tramite appositi processi di dissalazione dell'acqua di mare.

Le principali grandezze che caratterizzano l'impianto sono riportate di seguito e verranno discusse nel corso dell'analisi.

Tab. 3. Caratteristiche principali dell'impianto

Tipo di Reattore	IPWR ⁹
Potenza [MWth] ([MWe])	100 (27)
Arricchimento combustibile	3.4%
Tipologia di raffreddamento	Circolazione naturale
Volume refrigerante [m ³]	39
Portata primaria [kg/s]	410
Numero SG - tipologia	12 - Once Through
Pressione di esercizio [MPa]	12.25
Temperatura ingresso/uscita [K]	521 / 599
Pressione secondario [MPa]	4.7
Temperatura alimento secondario [K]	473
Temperatura minima vapore [K]	563
Dimensioni RPV d/h [m]	3.2/11

Il sistema primario, i sistemi di sicurezza, i componenti in pressione e gli ausiliari del reattore, sono contenuti in una struttura in calcestruzzo (contenimento) alla quale, internamente, è fissato un liner di acciaio. Il contenimento primario è progettato per svolgere la funzione di soppressione del vapore ed abbattimento della pressione ed è caratterizzato da dry-well e wet-well.

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE PRIMARIO

L'impianto CAREM è di tipo integrato (Fig. 6) e, all'interno del RPV, l'asportazione del calore prodotto dal nocciolo, anche durante il normale funzionamento, avviene per circolazione naturale. Il sistema di refrigerazione primario dell'impianto CAREM presenta anche una caratteristica particolare per quanto riguarda la pressione di funzionamento dell'impianto. Infatti, il pressurizzatore normalmente presente negli impianti ad acqua pressurizzata non è previsto poiché si lavora alla pressione di saturazione corrispondente alla temperatura di uscita del refrigerante primario dal nocciolo. Questa particolarità fa sì che il refrigerante primario, nelle sezioni più alte del nocciolo, abbia un ridottissimo grado di sottoraffreddamento, garantito dal solo battente d'acqua sovrastante.

⁹ IPWR – Integrated Pressurized Water Reactor. Impianto nucleare ad acqua pressurizzata con struttura integrata.

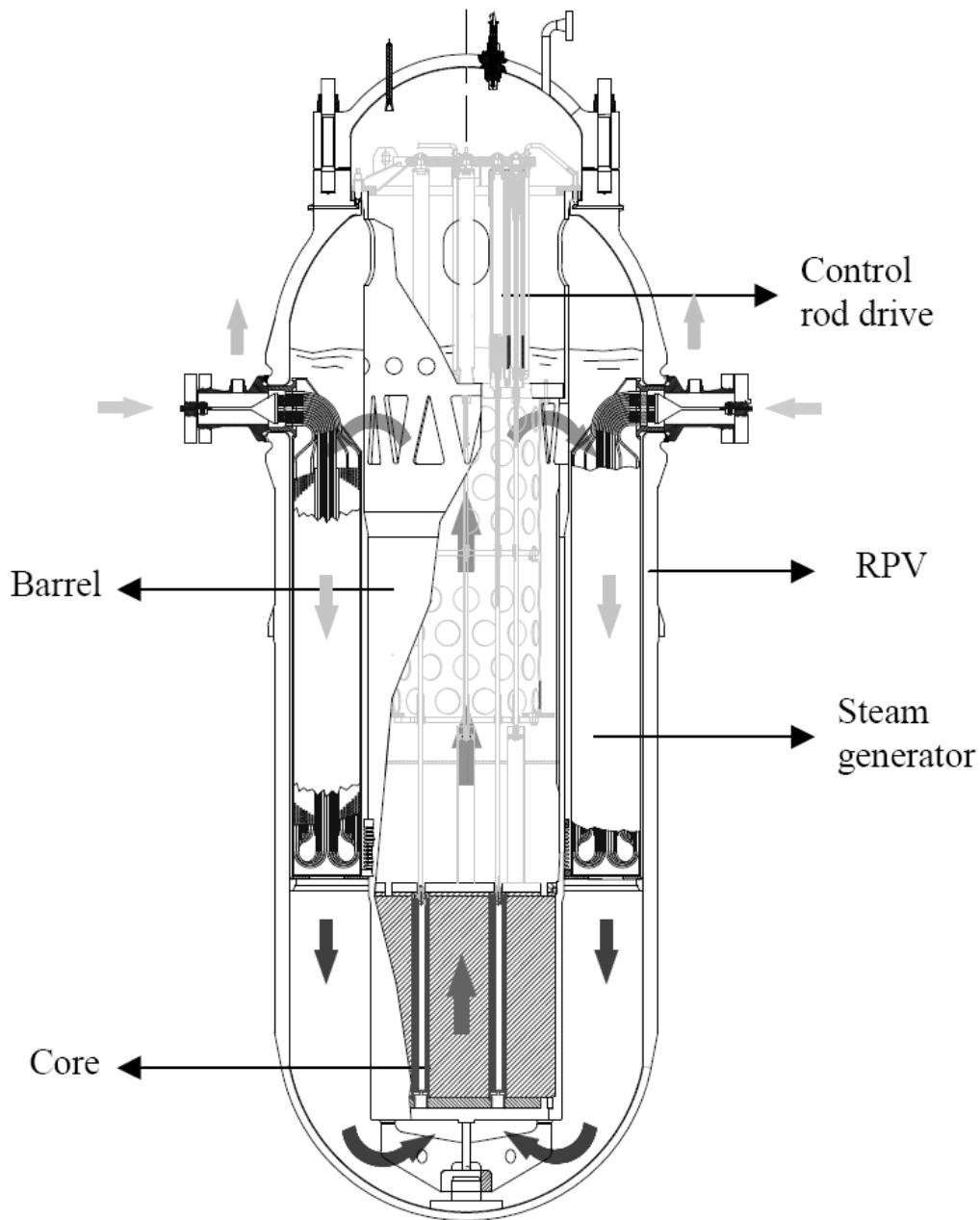


Fig. 6. Schema del RPV dell'impianto CAREM

PRIMO SISTEMA DI SPEGNIMENTO

Il sistema di spegnimento primario del nocciolo (FSS – First Shutdown System), caratterizzato da un meccanismo di movimentazione delle barre di controllo (CRDM – Control Rod Drive Mechanism) di tipo idraulico, previsto all'interno del RPV, consente di evitare l'impiego di alberi meccanici che attraversino il RPV poiché tutto il sistema, compresi i meccanismi per la movimentazione delle barre, sono previsti all'interno del vessel stesso.

Le barre di controllo sono 25, 6 di esse hanno funzioni di sicurezza e vengono mantenute sempre estratte, e sono movimentate attraverso un meccanismo idraulico che tramite un flusso ad impulsi consente alle barre uno spostamento "step-by-step" (Fig. 7). Un singolo impulso consente lo spostamento delle barre di un solo notch evitando così incidenti di reattività dovuti all'estrazione incontrollata delle barre. Entrambi i sistemi sono in grado di dare luogo allo scram. Le barre sono tenute estratte per la presenza del flusso nel sistema idraulico pertanto, se una valvola fallisse o la pompa si arrestasse, le barre verrebbero inserite nel nocciolo per gravità portandolo in condizioni di sottocriticità e causandone quindi lo spegnimento.

Le barre di sicurezza, tenute estratte tramite un analogo meccanismo idraulico, sono poste in un cilindro fisso con gap maggiore per ridurre il tempo di completo inserimento.

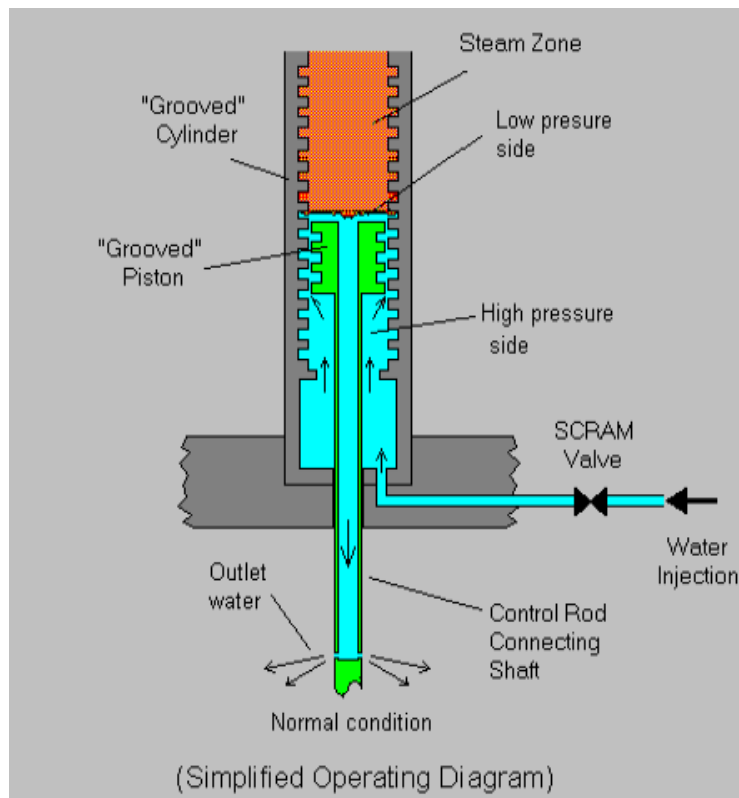


Fig. 7. CRDM idraulico, sistema di regolazione e controllo

SECONDO SISTEMA DI SPEGNIMENTO DEL REATTORE (SSS)

Il secondo sistema di spegnimento del reattore è basato sull'iniezione di acqua borata per gravità all'interno del circuito primario. Lo SSS viene attivato automaticamente non appena il sistema di protezione del reattore rileva il fallimento dello FSS o, eventualmente, in caso di un evento di LOCA al fine di garantire un reintegro del refrigerante primario.

Il sistema è composto da due serbatoi posti nella parte alta dell'edificio di contenimento, ognuno dei quali è connesso al RPV attraverso due tubazioni (raffigurate in colore blu nella Fig. 8), la prima connette il serbatoio con la parte alta del RPV dove è presente il vapore, la seconda con la parte più bassa del RPV al di sotto del livello dell'acqua durante il normale funzionamento.

Quando la pressione del sistema supera una certa soglia, stabilita in fase progettuale, le valvole si aprono automaticamente e l'acqua borata è iniettata nel primario per gravità. Il versamento dell'acqua borata di uno solo dei due recipienti è sufficiente ad inserire un'antireattività tale da ottenere lo spegnimento del reattore.

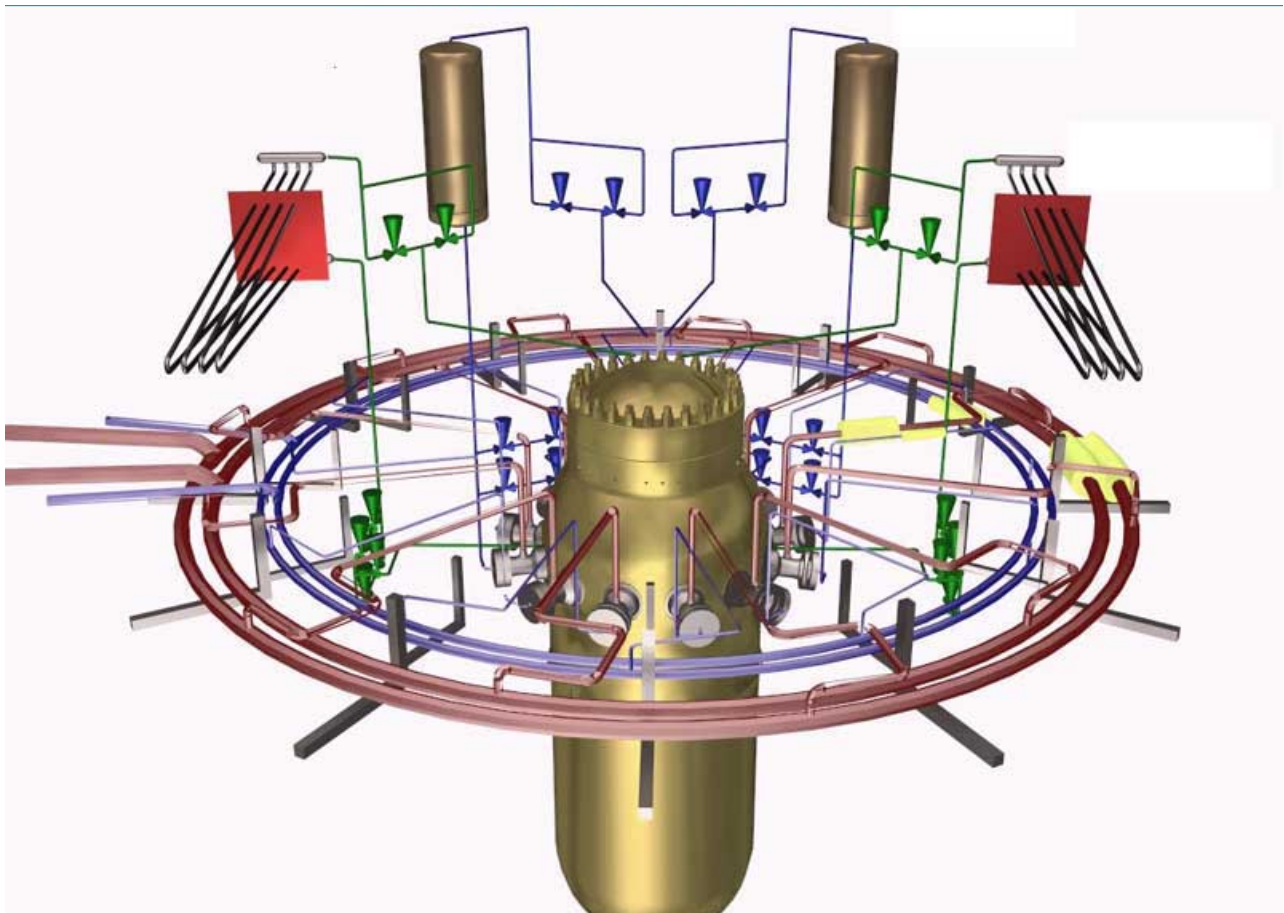


Fig. 8. Layout reattore CAREM e principali sistemi ausiliari

SISTEMA DI RIMOZIONE DEL CALORE DI DECADIMENTO RESIDUO

Il sistema di rimozione del calore di decadimento residuo (RHRS – Residual Heat Removal System) è progettato per due finalità infatti, oltre a garantire l'asportazione del calore residuo di decadimento nell'eventualità di perdita del pozzo di calore, è utilizzato anche per ridurre la pressione del primario. È un sistema costituito da due treni indipendenti ed è molto semplice dal punto di vista impiantistico poiché, ciascuno dei due treni, è dotato di uno scambiatore di calore e di apposite linee, dotate di valvole, che ne consentono la connessione al RPV. Questo sistema consente di prelevare il vapore, presente nella parte superiore del RPV, di condensarlo all'interno di condensatori di emergenza, disposti nella piscina di raffreddamento, e di reinserirlo nel downcomer.

Durante la fase progettuale, viene definita una soglia di pressione al di sopra della quale si ha l'apertura della valvola disposta sulla linea del condensato che connette gli scambiatori di calore disposti nell'apposita piscina al vessel.

L'acqua della piscina di raffreddamento, assorbendo il calore prodotto dal nocciolo, si porta in condizioni di ebollizione ed il vapore prodotto viene fatto condensare nell'apposita piscina di soppressione cui la stessa è connessa.

SISTEMA DI INIEZIONE DI EMERGENZA

Qualora si venisse ad avere un evento di LOCA il sistema viene depressurizzato tramite i condensatori di emergenza fino al raggiungimento di una pressione inferiore a 1.5 MPa e, nel contempo, il nocciolo viene mantenuto allagato. Per poter garantire la refrigerabilità del nocciolo a seguito di un LOCA, al raggiungimento della pressione di 1.5 MPa, un sistema di iniezione di emergenza entra in funzione passivamente, a seguito della rottura di un disco di tenuta, per garantire l'allagamento del nocciolo.

VALVOLE DI SFIORO DI SICUREZZA

Il RPV è dotato di 3 valvole di sfioro di sicurezza che proteggono il sistema da eventuali sovrapressioni, ciascuna di queste ha una capacità del 100%. Le tubazioni su cui sono installate tali valvole di sicurezza, in uscita dal RPV, sono convogliate nella piscina di soppressione al fine di ottenere l'abbattimento della pressione.

GENERATORI DI VAPORE

Per la produzione del vapore da inviare in turbina sono previsti 12 generatori di vapore (SG – Steam Generator) elicoidali di tipo “Once-Through” disposti uniformemente nella zona anulare tra il barrel ed il RPV (Fig. 9). Tali SG producono, lato interno tubi, vapore a 4.7 MPa con circa 30°C di surriscaldamento. Tali SG sono disposti in modo tale che la quota della loro sezione inferiore risulti al di sopra di quella massima del nocciolo al fine di migliorare le condizioni di circolazione naturale nel circuito primario.

I tubi degli SG sono progettati per resistere alla pressione del primario, dall'esterno, in assenza del refrigeratore secondario, presente normalmente lato tubi. Ogni SG ha la propria penetrazione indipendente nel RPV, ciascuna di queste penetrazioni è utilizzata per l'ingresso dell'acqua di alimento e per l'uscita del vapore surriscaldato dello SG connesso.

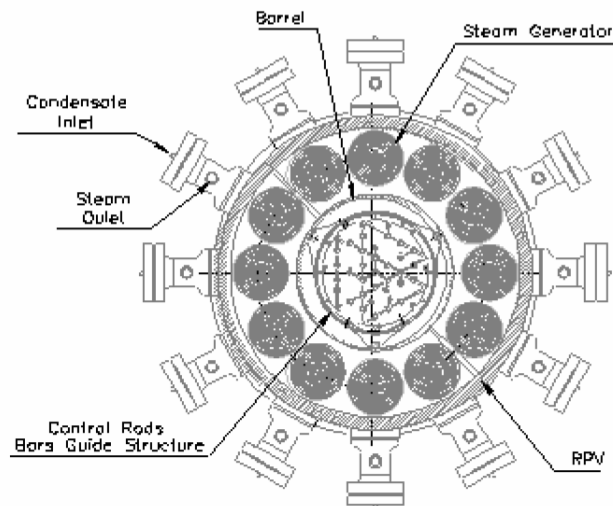


Fig. 9. Lay out degli SG

SISTEMI ATTIVI IN ADDIZIONE A QUELLI PASSIVI

SISTEMA DI PURIFICAZIONE E RAFFREDDAMENTO DELLA PISCINA DI SOPPRESSIONE

Tale sistema è progettato per poter raffreddare e reintegrare l'acqua nelle piscine di soppressione e nella piscina di raffreddamento dei condensatori di emergenza, può inoltre alimentare gli spray nel dry-well e nel wet-well con lo scopo ultimo di depressurizzare il contenimento. Inoltre, in caso di LOCA, questo sistema è in grado di iniettare acqua nel RPV.

SISTEMA DI INIEZIONE DI ACQUA NELLA CAVITÀ REATTORE

Sono previste opportune configurazioni per iniettare acqua nella cavità reattore prelevandola dalla piscina di stoccaggio per il refueling (RWST). L'allagamento della cavità reattore consente la refrigerazione del RPV, tramite acqua che defluisce all'esterno dello stesso, asportando il calore di decadimento residuo, prodotto dal corium fuso riallocato nella testa inferiore del RPV. Questo sistema sfrutta i vantaggi dati dall'alto valore

A_{testaRPV}

del rapporto M_{core} che caratterizza i reattori con struttura integrata.

SICUREZZA E ANALISI DI ALCUNI INCIDENTI

BASI DI PROGETTO

Parecchi eventi iniziatori dei LWR commerciali sono stati esclusi, nel progetto CAREM, già nella fase progettuale attraverso opportune scelte che vengono riportate di seguito:

- Il diametro della penetrazione più grande che attraversa il RPV è di circa 3,8 cm. Questa scelta fa sì che l'eventuale rottura di questa tubazione, in cui circola refrigerante primario, comporti solo ad una limitata perdita di refrigerante, escludendo, da progetto, l'evento di LBLOCA. Questo aspetto risulta molto importante ai fini impiantistici in quanto la massima portata di reintegro risulta automaticamente limitata.
- L'incidente di inserzione di reattività (RIA – Reactivity Insertion Accident) dovuto all'espulsione di una barra di controllo, a seguito del fallimento della tenuta del sistema di movimentazione al di sopra della testa del RPV, è stato eliminato sviluppando un sistema di movimentazione delle barre di controllo di tipo idraulico disposto completamente all'interno del RPV;
- Un grande quantitativo di refrigerante, all'interno del vessel, garantisce elevata inerzia rispetto ai transitori termici (elevato tempo di risposta e piccole perturbazioni);
- L'utilizzo dello schema di reattore integrato ha consentito di eliminare i tradizionali loop di circolazione che normalmente portano il fluido primario al di fuori del RPV obbligando il progettista a prevedere schermi aggiuntivi anche in tali zone;
- La presenza di un grande quantitativo di acqua nella zona anulare, compresa tra il core barrel e il RPV, dove alloggiano gli SG, funge anche, al livello del nocciolo, da schermo neutronico e la dose che assorbe il RPV risulta ridotta (con conseguente possibile allungamento della vita utile);
- L'assenza del pressurizzatore e della pompa primaria riduce costi di manutenzione e di investimento, nonché possibili eventi iniziatori di incidenti.

INCIDENTE DI REATTIVITÀ (RIA)

L'incidente di inserzione di reattività, dovuto all'espulsione di una barra di controllo, non può essere considerato per l'impianto CAREM poiché il CRDM è posto all'interno del RPV. Inoltre, non essendo previsto l'impiego di boro durante il normale esercizio, sono da escludersi anche incidenti legati alla diluizione del boro stesso nel refrigerante primario. L'unica possibilità residua, di avere un'inserzione di reattività, è associata all'evento di estrazione incontrollata di una barra di controllo (transitorio a step prefissati); a questa eventualità seguono due possibili situazioni:

- Spegnimento del reattore grazie all'intervento dello FSS
- Fallimento dello FSS e spegnimento del reattore tramite intervento dello SSS

In entrambe le situazioni si rimane comunque sufficientemente lontani dalle condizioni di crisi termica.

PERDITA DEL POZZO DI CALORE (LOHS)

Nell'eventualità di completa mancanza di acqua di alimento al generatore di vapore (SG) si avvia lo RHRS che consente di raffreddare il primario e di ridurre la pressione a valori inferiori rispetto a quelli della condizione di arresto caldo. In caso di fallimento dello FSS la potenza del reattore si riduce comunque grazie ai coefficienti di reattività negativi, che lo caratterizzano, senza che si abbia il rischio di compromettere l'integrità del combustibile. Lo SSS garantisce lo spegnimento del reattore a medio e lungo termine (il completo inserimento dell'acqua borata da un singolo serbatoio è stimato avvenire in un tempo prossimo ai 5 minuti, tempo entro il quale si prevede lo spegnimento del reattore).

PERDITA TOTALE DI FLUSSO PRIMARIO (LOFA)

Esistono reattori della tipologia CAREM di differenti taglie, quello che si è analizzato a causa della taglia ridotta cui si sta facendo riferimento in questo documento e della maggiore disponibilità di dati è il prototipo da 27MWe con il quale si vuole dimostrare la validità delle scelte progettuali. Le taglie commerciali previste saranno comprese tra 100 MWe e 300 MWe; considerando come valore di riferimento 150 MWe, si prevede di avere il refrigerante primario in circolazione naturale per taglie inferiori a tale valore di riferimento e circolazione forzata, quindi presenza di pompe di circolazione primaria, per le taglie superiori. Nel caso analizzato l'evento di LOFA non è quindi prevedibile, evento che, deve essere analizzato facendo particolare attenzione al funzionamento delle pompe di circolazione.

PERDITA DI REFRIGERANTE PRIMARIO (LOCA)

Da progetto viene limitato il diametro delle penetrazioni del RPV attraversato dal refrigerante primario pertanto l'incidente di LBLOCA non è ipotizzabile e non risulta necessario prevedere alcun sistema di

iniezione per l'acqua di reintegro ad alta pressione. Qualora si verificasse un evento di LOCA si prevede l'attivazione dello FSS, dello SSS e dello RHRS su segnale di bassa pressione. Il sistema di iniezione garantisce che il nocciolo rimanga allagato per diversi giorni. In particolare è stata simulata l'eventualità di un evento di LOCA con conseguente intervento dello FSS ma con contemporaneo fallimento di tutti i sistemi previsti per la refrigerazione del nocciolo. Data la bassa densità di potenza del reattore, il nocciolo, in tale situazione, si asciugherebbe dopo diverse ore garantendo comunque un sufficiente tempo per intervenire dall'esterno.

ROTTURA DI UNA TUBAZIONE DEL GENERATORE DI VAPORE (SGTR)

Ogni SG, come visto in precedenza, è caratterizzato da una sua propria penetrazione; nel caso di rottura di una tubazione, di uno qualsiasi dei generatori di vapore, è possibile chiudere le valvole di intercettazione sulla linea vapore e su quella dell'acqua di alimento non generando nessun inconveniente ai restanti SG. Lo SG guasto viene pressurizzato dal primario fino al raggiungimento dell'equilibrio ed il reattore può, eventualmente, continuare ad esercire a potenza ridotta. Continuando ad esercire l'impianto in presenza di uno SG non funzionante si generano, all'interno del RPV, delle disuniformità nel deflusso del refrigerante primario, amplificate dal fatto che si è scelto di esportare il calore in circolazione naturale.

ROTTURA LINEA VAPORE

La rottura della linea vapore (SLBA – Steam Line Break Accident) causa l'improvvisa depressurizzazione e conseguente vaporizzazione del secondario che da luogo ad un aumento della rimozione di calore dal refrigerante primario il quale si porta, mediamente, ad una temperatura minore rispetto alle condizioni di normale funzionamento. Tale riduzione della temperatura del refrigerante primario, per via dei coefficienti di reattività del moderatore, genera delle condizioni di sovrapotenza. Come conseguenza è richiesto l'intervento dello FSS, dello SSS e dello RHRS che portano il reattore in una condizione sicura. In caso di fallimento dei sistemi di spegnimento del reattore, la sovrapotenza del nocciolo non causa comunque il raggiungimento delle condizioni di crisi termica a causa dell'intrinseca limitazione, all'asportazione di calore dal refrigerante primario, dovuta al ridotto quantitativo di acqua presente lato tubi (dovuta alla tipologia di SG previsto, once-through lato secondario).

BLACK-OUT NPP

In caso di black-out lo spegnimento del reattore e la rimozione del calore residuo di decadimento sono garantiti in ogni caso. La mancanza di alimentazione della pompa utilizzata per la movimentazione delle barre di controllo genera la perdita del flusso idraulico che, nel normale funzionamento, le mantiene estratte. La conseguenza diretta che viene ad aversi è l'inserimento, per gravità, delle barre di controllo all'interno del nocciolo. Anche se lo FSS e lo SSS fallissero, grazie ai coefficienti di reattività negativi, il reattore si porterebbe da solo a spegnimento senza avere ripercussioni sulle grandezze che influenzano le condizioni della crisi termica.

MRX (GIAPPONE)

DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

Il reattore giapponese MRX è stato sviluppato per la propulsione di navi commerciali, gli obiettivi di progetto sono la minimizzazione del volume e del peso, oltre che dei costi, e la massimizzazione dell'utilizzo di sistemi di sicurezza passivi.

Tab. 4. Caratteristiche impianto

Tipo di Reattore	IPWR
Potenza [MWth]	100
Arricchimento combustibile	4.3%
Tipologia di raffreddamento	Circolazione forzata
Portata primaria [t/h]	4500
Numero SG e tipologia	2 treni Once Through
Pressione di esercizio [MPa]	12.0
Temperatura ingresso/uscita [K]	555.7 / 570.7
Pressione secondario [MPa]	4.0
Temperatura minima vapore [K]	562
Dimensioni RPV d/h [m]	3.7 / 9.7
Dimensioni contenimento d/h [m]	7/13.3
Pressione del contenimento [MPa]	4.0

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE PRIMARIO

Il reattore MRX è caratterizzato da una struttura integrata nella quale sono inclusi i generatori di vapore e le pompe di circolazione. Di seguito sono riportate due immagini, nella prima (Fig. 10) si può osservare la struttura del sistema in cui si nota la presenza di due vessel separati, uno all'interno dell'altro, in modo simile a quanto previsto già per l'impianto MARS. Nella seconda immagine (Fig. 11) è rappresentato invece uno schema di funzionamento dell'impianto stesso.

SISTEMA DI SPEGNIMENTO PRIMARIO (FSS)

Il primo sistema di spegnimento (Fig. 12) è interno al RPV ed è stato sviluppato dallo JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute), esso consiste in un motore di guida, un magnete di tenuta, un albero guida, una struttura con sfere mobili, un rivelatore di posizione ed una sorgente di alimentazione.

Il sistema, così come è stato sviluppato, consente di effettuare frequenti variazioni del carico consentendo di non utilizzare il boro durante il normale funzionamento. Evitando l'utilizzo del boro è eliminato di conseguenza anche il sistema di regolazione della chimica del refrigerante (semplificazione impiantistica e vantaggio economico). La gravità dell'incidente di reattività dovuto all'improvvisa espulsione di una barra di controllo, nei normali PWR, è limitato dando poco peso, in termini di reattività, ad ogni singola barra ed utilizzando il boro disciolto nel primario.

La tipologia di CRDM utilizzata nell'impianto MRX si basa sull'impiego di un motore elettrico all'interno del RPV che consente una velocità di movimentazione delle barre di controllo di 300 mm/min (scram $t=1.4s$).

Il CRDM lavora ad una temperatura di 583 K e pressione di 12.0 MPa, la sostituzione del meccanismo di guida è prevista ogni 20 anni ed è garantito per avere la capacità di effettuare almeno 1000 scram nel corso della vita. Il refueling, in questo impianto, è previsto ogni 4 anni e durante le operazioni necessarie alla sostituzione del combustibile esaurito, il sistema di movimentazione delle barre di controllo risulta facilmente ispezionabile.

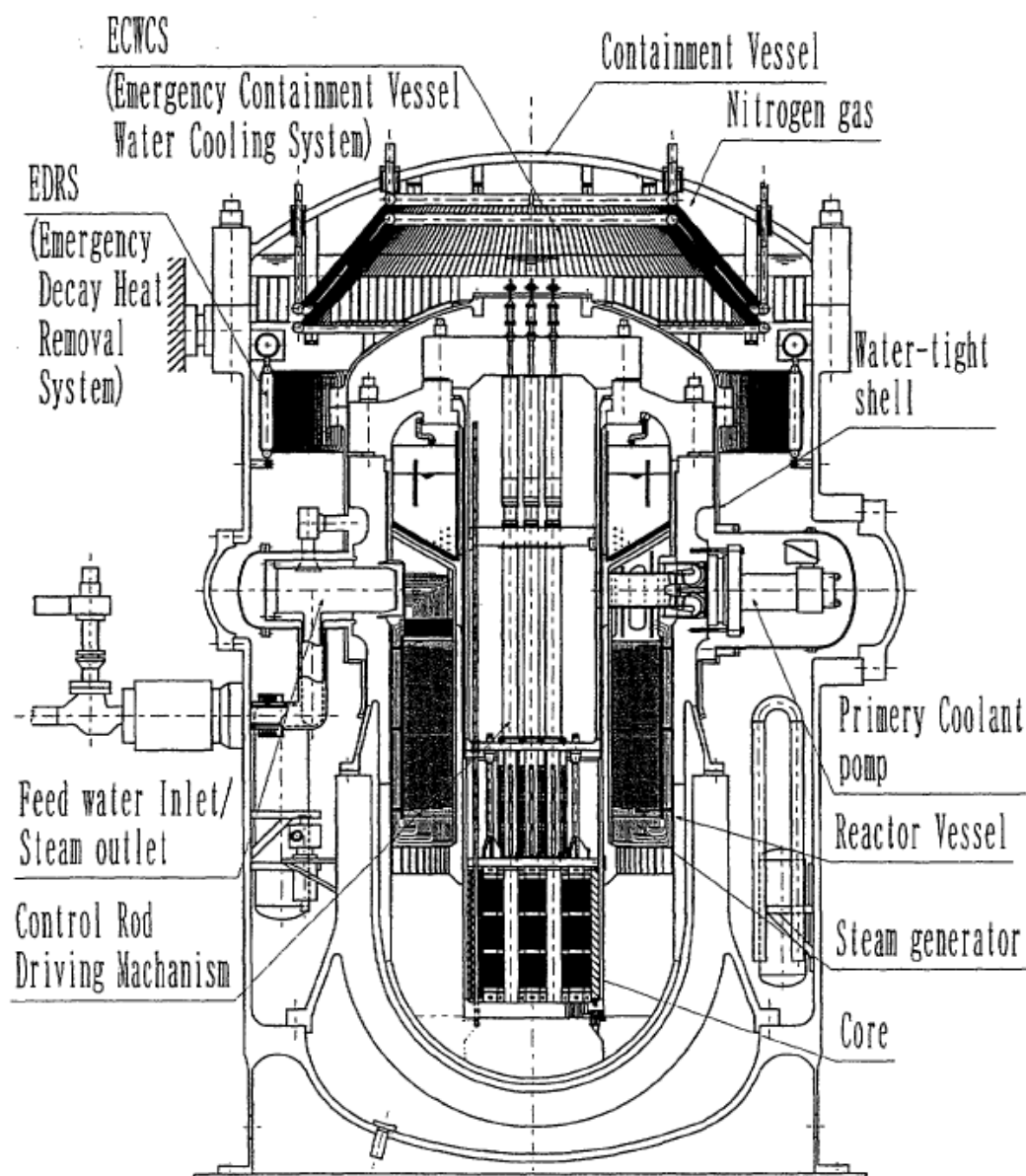


Fig. 10. Schema del primario e del contenimento

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE DEL NOCCIOLO IN EMERGENZA

Il sistema di rimozione del calore di decadimento in condizioni di emergenza (ECCS – Emergency Core Cooling System) è composto da due sistemi cui è richiesto il contemporaneo funzionamento lo EDRS, e il CWCS oltre alla presenza dell'acqua nel contenimento (Fig. 11) che funge da connessione tra i due sistemi precedenti. La funzione affidata a questi sistemi è di mantenere allagato il nocciolo per garantire la rimozione del calore di decadimento residuo in caso di rottura del confine in pressione primario. L'allagamento del nocciolo è garantito, passivamente, attraverso il bilancio delle pressioni vigenti nel contenimento e nel RPV all'inizio del transitorio e con l'ausilio dello EDRS e del CWCS nelle fasi successive. L'allagamento del nocciolo, in caso di LOCA, è garantito senza necessità di prevedere pompe o accumulatori.

L'aumento di pressione che coinvolgerebbe il contenimento, qualora questo venisse a trovarsi in comunicazione con il primario, è limitato per via dell'acqua fredda, presente nel contenimento, che garantisce la condensazione del vapore. In base al livello dell'acqua, presente all'inizio delle operazioni, e del volume di azoto necessario per la pressurizzazione del contenimento, si può definire il livello che l'acqua

raggiunge, rispetto al nocciolo, in seguito ad un evento di LOCA. Sono state studiate opportune correlazioni, su questo progetto, per poter prevedere il livello raggiunto a seguito di un evento incidentale.

I sistemi sopra descritti rimuovono il calore se non è possibile asportarlo attraverso lo RHRS e gli SG. Per avviare il sistema EDRS, intercettato da una valvola sulla linea del condensato in condizioni di normale funzionamento, è necessario fornire un piccolo impulso alla stessa per averne l'apertura (l'alimentazione di tale sistema è garantita da una batteria).

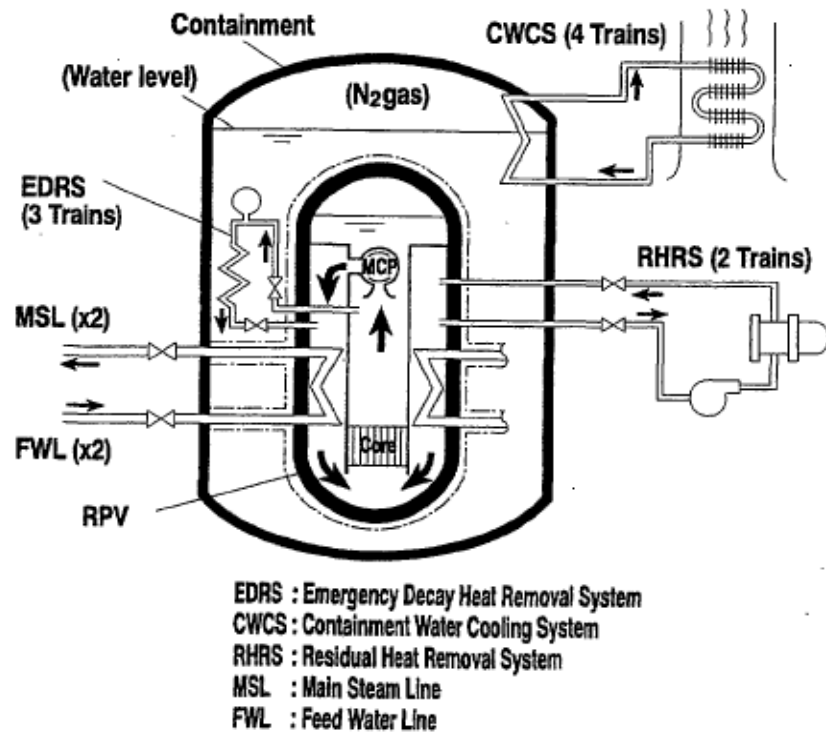


Fig. 11. Rappresentazione schematica dei sistemi presenti nell'impianto

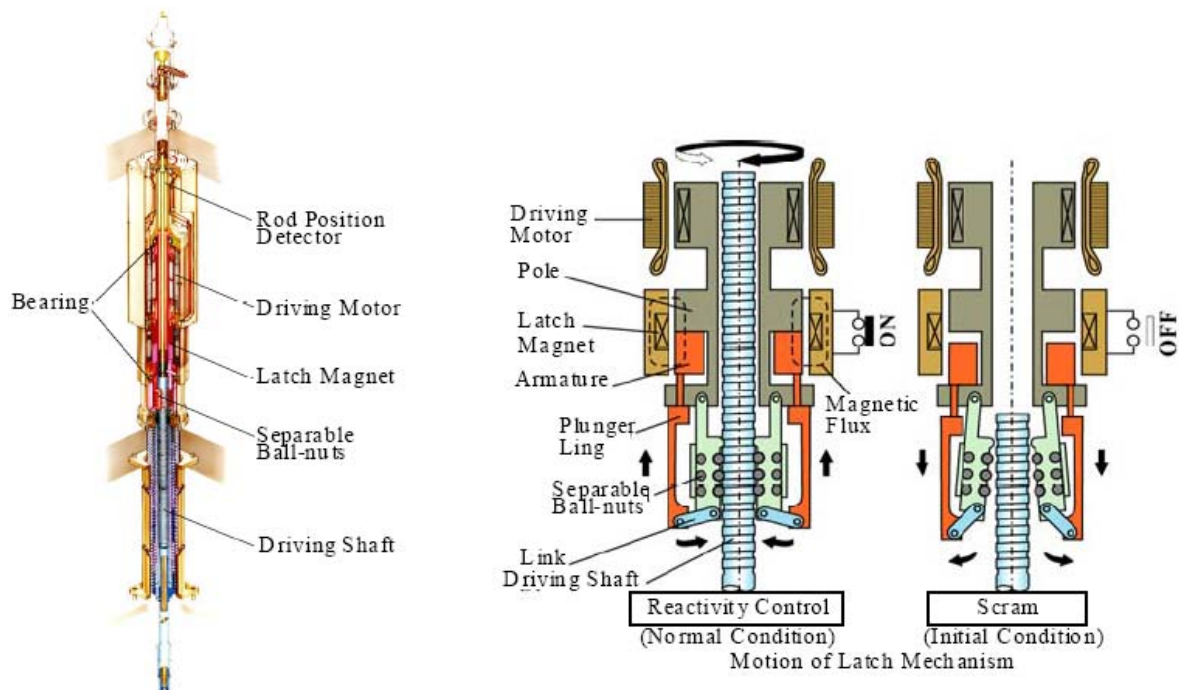


Fig. 12. CRDM-INV di concezione giapponese

Il sistema EDRS è composto da tre treni, ciascuno con capacità di asportazione pari al 100% della potenza di decadimento prodotta, mentre il sistema CWCS è composto da quattro treni, tre con capacità del 100% e uno del 33%.

Il calore di decadimento residuo viene rimosso a seguito dell'apertura della valvola sulla gamba fredda del circuito EDRS. Tale asportazione di calore avviene secondo la seguente modalità: il vapore, che occupa la parte più alta del RPV, fluisce nel circuito EDRS e viene condensato all'interno dello scambiatore di calore posto all'interno del recipiente pieno di acqua in pressione. Una volta condensato, il refrigerante primario, viene reinserito nel downcomer del RPV. Si vengono ad instaurare le condizioni per avere la circolazione naturale del refrigerante primario che defluisce tra il RPV ed i due rami che connettono lo scambiatore di calore del circuito EDRS, grazie al quale il calore di decadimento, prodotto dal nocciolo, viene ceduto all'acqua del contenimento. Il calore così assorbito dall'acqua del contenimento è quindi rilasciato in atmosfera attraverso un ulteriore scambiatore di calore presente nel circuito CWCS. Dopo 300 s dall'apertura del circuito la potenza asportata è maggiore di quella prodotta e la temperatura di uscita del nocciolo inizia a diminuire fino a quando, dopo circa 600 s la temperatura arriva un valore che rimarrà circa costante.

ALTRE STRUTTURE INTERNE AL RPV

GENERATORI DI VAPORE (SG)

Gli SG previsti sono di tipo "once-through" e presentano un fascio tubiero avvolto ad elica, tipico dei reattori di tipologia integrata. I generatori di vapore sono disposti nella zona anulare tra il core barrel ed il RPV e sono previsti essere appesi alla flangiatura del RPV. Per semplicità di gestione, durante le operazioni di refueling, non è necessario rimuovere gli SG ed è inoltre possibile ispezionarli tramite apposite sonde inserite dalla testa.

PRESSURIZZATORE (PZR)

Il pressurizzatore è della tipologia a bolla di vapore, di tipo tradizionale, con una geometria piatta, ad anello, disposto attorno ai meccanismi di movimentazione delle barre di controllo. Come visto, in questo impianto, i meccanismi di movimentazione delle barre di controllo sono previsti all'interno del RPV. Il livello dell'acqua presente all'interno del pressurizzatore è scelto in maniera tale che si eviti l'allagamento degli spruzzatori e/o l'asciugamento dei riscaldatori in qualsiasi situazione¹⁰. La surge line, che negli impianti PWR tradizionali mantiene in comunicazione l'acqua del circuito primario con quella presente all'interno del pressurizzatore, è sostituita, in questa configurazione, da una serie di fori presenti nella parte inferiore del pressurizzatore.

POMPE PRIMARIE (MCP)

La circolazione del refrigerante primario, per l'asportazione del calore prodotto dal nocciolo, è garantita da particolari pompe caratterizzate da una geometria ad asse orizzontale e flangiate direttamente al RPV. Nelle soluzioni più tradizionali, le pompe ad asse orizzontale, non vengono utilizzate poiché presentano due inconvenienti in particolare:

1. Possibilità di deformazione dell'albero a seguito di fermate ad alta temperatura;
2. La non uniformità del carico sul rotore genera analoghi sforzi, sui cuscinetti radiali, che risultano di difficile definizione.

Questi particolari problemi, legati alla disposizione orizzontale degli alberi delle pompe, sono stati affrontati e risolti attraverso l'impiego, rispettivamente, di motori snelli e di particolari cuscinetti radiali al carbonio.

ANALISI DEI TRANSITORI IN NORMALI OPERAZIONI

In maniera analoga agli impianti tradizionali, la pressione del sistema viene controllata, dall'interno del pressurizzatore, tramite i riscaldatori e gli spruzzatori; inoltre il livello, all'interno del pressurizzatore, è mantenuto, entro determinati range, attraverso il sottosistema di controllo del volume.

¹⁰ Essendo un impianto sviluppato per la propulsione navale, devono essere tenuti in considerazione particolari problemi legati al moto oscillatorio al quale il reattore può essere sottoposto. Pertanto, in fase di progetto, si stabiliscono dei valori massimi accettabili per quanto riguarda la massima inclinazione che il reattore può avere durante il normale funzionamento.

La pressione di uscita degli SG può essere controllata, indipendentemente dal flusso di vapore, tramite il sistema di controllo dell'acqua di alimento. Asservendo il sistema di alimentazione dell'acqua di alimento alla temperatura del primario, a seguito di variazioni di carico si riesce sempre ad avere pressione e temperatura del vapore prodotto costanti. È inoltre prevista una valvola di scarico sulla linea vapore per poter avere una repentina riduzione della produzione di vapore, cosa che non può essere fatta istantaneamente attraverso la variazione della temperatura del refrigerante.

SICUREZZA E ANALISI DI ALCUNI INCIDENTI

BASI DI PROGETTO

Come in tutti i progetti di reattori nucleari di piccola taglia, al fine di rendere l'impianto più affidabile e semplice, quindi economico, sono state fatte scelte strategiche già durante la fase di progetto, come:

- Sono stati eliminati dei processi chimici, relativi alla regolazione della concentrazione del boro, in quanto questo non è utilizzato durante il normale funzionamento dell'impianto. L'impiego del boro è limitato esclusivamente al sistema di spegnimento secondario del reattore. Questa caratteristica consente di ottenere semplificazioni nelle operazioni e riduzione delle possibili cause che portano ad eventi incidentali;
- Non sono previsti dei sistemi di iniezione per l'acqua di reintegro. L'allagamento del nocciolo, in caso di LOCA, è garantito grazie all'iniezione, passiva, dell'acqua presente nel contenimento esterno;
- E' previsto l'impiego di un sistema per la rimozione del calore di decadimento residuo, in condizioni di emergenza, di tipo passivo (è un sistema passivo classificato in classe D secondo le definizioni ufficiali IAEA, avviamento attivo e funzionamento passivo).

INSERZIONE DI REATTIVITÀ

L'incidente di Control Rod Ejection che, come già detto è notoriamente un incidente base di progetto per gli impianti PWR di tipo tradizionale, è eliminato tramite opportune scelte progettuali. Il meccanismo di movimentazione delle barre di controllo, sviluppato appositamente per questo reattore, è contenuto completamente all'interno del RPV. Anche l'incidente di diluizione del boro, seppur caratterizzato da transitori con tempi decisamente maggiori, non è previsto poiché non è utilizzato il boro durante le normali operazioni.

LOCA

Nell'analisi dei transitori, che seguono un evento di LOCA, si è considerata la rottura di una tubazione del sistema di asportazione del calore di decadimento, EDRS, le cui tubazioni hanno un diametro di 50 mm. Si sono quindi analizzati gli eventi che seguono tale rottura, e gli effetti che la stessa rottura genera all'impianto stesso. La tubazione, di cui si ipotizza la rottura, è inclusa all'interno del contenimento in pressione pertanto, a seguito del fallimento della stessa, si viene a creare una via di contatto tra i due sistemi (primario e contenimento) che si comporteranno come un unico sistema.

Ipotizzando tale rottura all'istante $t=0$, negli istanti iniziali l'andamento della pressione tende ad essere rapidamente decrescente, successivamente, tra 40 e 520 s la pressione tende a ridursi con una minore velocità a causa del cambiamento di fase del flusso nel punto di rottura che, dalle iniziali condizioni di liquido sottoraffreddato, si è portato in fase vapore. Attorno ai 100 s dalla rottura, su segnale di bassa pressione lato primario, viene richiesto, dai sistemi di protezione del reattore, lo scram. I circuiti EDRS rimasti intatti si avviano, dopo l'apertura delle valvole di intercettazione, garantendo l'asportazione del calore residuo di decadimento a partire da circa 300 s dall'inizio del transitorio. La pressione all'interno del contenimento aumenta fino a quando, dopo 520 s, si raggiunge la condizione di uguaglianza tra la pressione del primario e quella del contenimento stesso. Raggiunto questo equilibrio, la fuoriuscita del refrigerante si arresta. Il livello del refrigerante primario, all'interno del RPV, a seguito del LOCA si riduce ma, rispetto alla sezione superiore del nocciolo, è sempre presente un battente di 2 m che ne garantisce l'allagamento.

PSDR (GIAPPONE)

DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

L'impianto PSDR nasce come evoluzione dell'impianto MRX, e anche se non concepito con la finalità esclusiva della propulsione navale, ne riprende diverse caratteristiche. Questo impianto si prefissa anche altri obiettivi, i principali tra questi sono riportati di seguito:

- Incremento dei sistemi passivi utilizzati al fine di garantire la sicurezza dell'impianto;
- Semplificazione del sistema reattore che si traduce in un aumento della sicurezza e in una riduzione dei costi di investimento e di manutenzione;
- Aumento della durata del ciclo di irraggiamento del combustibile all'interno del reattore senza necessità di prevedere interventi intermedi per la manutenzione. Tali fattori comportano direttamente una riduzione dei costi (il refueling è previsto ogni 5 anni).

Le caratteristiche principali dell'impianto sono riportate di seguito:

Tab. 5. Caratteristiche principali dell'impianto

Tipo di Reattore	IPWR
Potenza [MWth] ([MWe])	300 (95)
Arricchimento combustibile	4.7%
Tipologia di raffreddamento	Circolazione naturale
Portata primaria [kg/s]	1200
Numero SG e tipologia	2 treni Once Through
Pressione di esercizio [MPa]	10.0
Temperatura ingresso/uscita [K]	538 / 584
Pressione secondario [MPa]	4.0
Temperatura minima vapore [K]	574
Dimensioni RPV d/h [m]	6 / 14
Pressione del contenimento [MPa]	2.0

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE PRIMARIO

Il RPV, di tipologia integrata, comprende al suo interno i generatori di vapore, di tipologia once-through, mentre non presenta le pompe di circolazione primarie poiché la refrigerazione del nocciolo, anche durante le normali condizioni di esercizio, è prevista essere in circolazione naturale. Uno schema semplificato dell'impianto (Fig. 13) e la disposizione dei sistemi all'interno del RPV (Fig. 14) sono riportati nelle figure di seguito.

Il contenimento pieno di acqua in pressione, all'esterno del RPV, è analogo a quello dell'impianto MRX. In una delle possibili soluzioni studiate, si ipotizza che possa essere inserito in pozzi pieni di acqua di mare ricavati in zone in prossimità delle coste¹¹. Nella soluzione tradizionale, analogamente all'impianto MRX, è previsto che l'ambiente esterno sia costituito da sola aria; in tal caso risulta necessario predisporre appositi scambiatori di calore per garantire il rilascio, in condizioni di emergenza, del calore di decadimento prodotto nel primario all'atmosfera esterna. La sola componente di conduzione attraverso le pareti del contenimento, con aria all'esterno, non è più sufficiente a garantire la refrigerabilità del sistema.

SISTEMA DI SPEGNIMENTO PRIMARIO

Il sistema di spegnimento primario del reattore, poiché analogo a quello sviluppato per il reattore MRX, non verrà trattato di seguito (vedere pag. 19).

¹¹ Si sono state studiate soluzioni per l'installazione di questi sistemi all'interno di pozzi al di sotto del livello del mare che, tramite opportune condotte, vengono riempiti di acqua. Tali studi analizzano la possibilità di installare tali impianti anche a 50 – 100 m sotto il livello del mare.

SISTEMA DI SPEGNIMENTO SECONDARIO

Il sistema di spegnimento secondario (SSS), di tipo passivo, presenta delle caratteristiche innovative rispetto alla soluzione applicata nell'impianto MRX in cui si prevede la possibilità di avere, nelle sole condizioni incidentali, iniezione di acqua borata¹². A differenza dello FSS che per attuare lo spegnimento rapido del reattore deve aver ricevuto un segnale dal sistema di protezione dell'impianto, lo SSS attua lo scram come risposta passiva ad un aumento di temperatura media del refrigerante primario. Il sistema è basato su una giunzione magnetica, prevista a metà dell'albero di movimentazione delle barre di controllo e quindi disposta al di sotto del CRDM, consistente in un magnete permanente e in un magnete di controllo, quest'ultimo con la caratteristica di saturazione del flusso magnetico fortemente dipendente dalla temperatura. Ad alta temperatura la forza attrattiva, esercitata tra i due magneti, è così bassa che le barre di sicurezza cadono per gravità nel nocciolo provocandone lo spegnimento. La temperatura massima al di sopra della quale si ha lo spegnimento passivo del reattore, è decisa in sede progettuale tramite la scelta dei magneti ed è raggiunta nel caso in cui la temperatura media del refrigerante in uscita dal nocciolo supera una prefissata soglia.

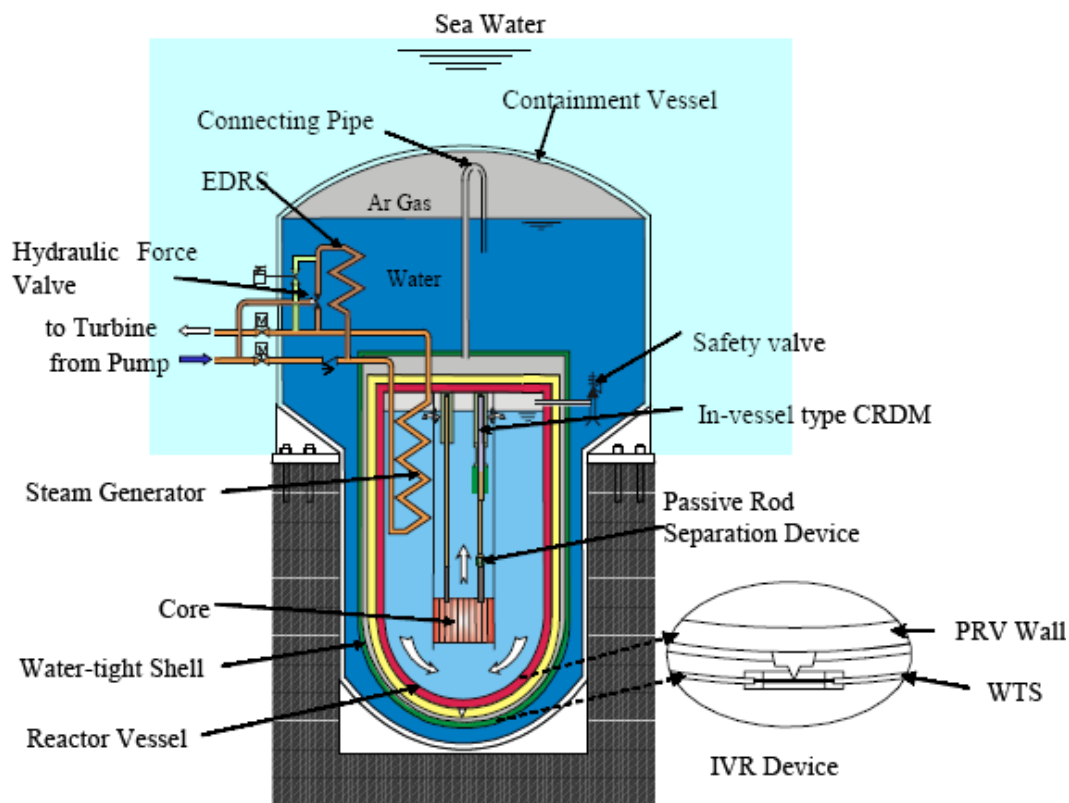


Fig. 13. Schema semplificato dell'impianto PSRD

TRANSITORI DURANTE LE NORMALI OPERAZIONI

Durante il funzionamento a regime, il refrigerante primario (in condizioni di liquido sottoraffreddato) passa attraverso il nocciolo, riscaldandosi, per poi raggiungere la zona degli SG lato mantello. Per consentire all'acqua di passare dall'interno all'esterno del core barrel, su quest'ultimo sono previste delle perforazioni. Il livello del refrigerante primario, durante il normale funzionamento e nei transitori operazionali, oscilla tra il livello superiore ed inferiore di tali aperture.

Sistemi di controllo del volume e per la purificazione del refrigerante primario non sono utilizzati continuamente durante il normale funzionamento e ne è pertanto prevista l'intercettazione. Questo accorgimento consente una semplificazione del sistema e riduce la possibilità che possano verificarsi eventi di LOCA. Tali sistemi sono comunque previsti e vengono utilizzati in situazioni prestabilite come ad esempio prima di effettuare l'apertura del RPV necessaria per le operazioni di refueling.

¹² Nell'impianto PSRD l'utilizzo di acqua borata non è mai previsto né durante il funzionamento né in caso di situazioni incidentali

Le penetrazioni presenti nel RPV sono state minimizzate e sono previste solamente per l'ingresso dell'acqua di alimento, per l'uscita del vapore e per le valvole di sicurezza connesse con la parte superiore del RPV. Come evoluzione, rispetto alla soluzione prevista per l'impianto MRX, al fine di ridurre il numero di penetrazioni nel RPV, sono stati eliminati i circuiti indipendenti del sistema EDRS (in precedenza dotati di linee dedicate) che, in questo caso, sono previsti avere un primo tratto in comune con la tubazione degli SG. In questa maniera, la già necessaria penetrazione prevista per i generatori di vapore, viene utilizzata anche per il circuito di asportazione del calore di decadimento residuo riducendo il numero globale di penetrazioni necessarie.

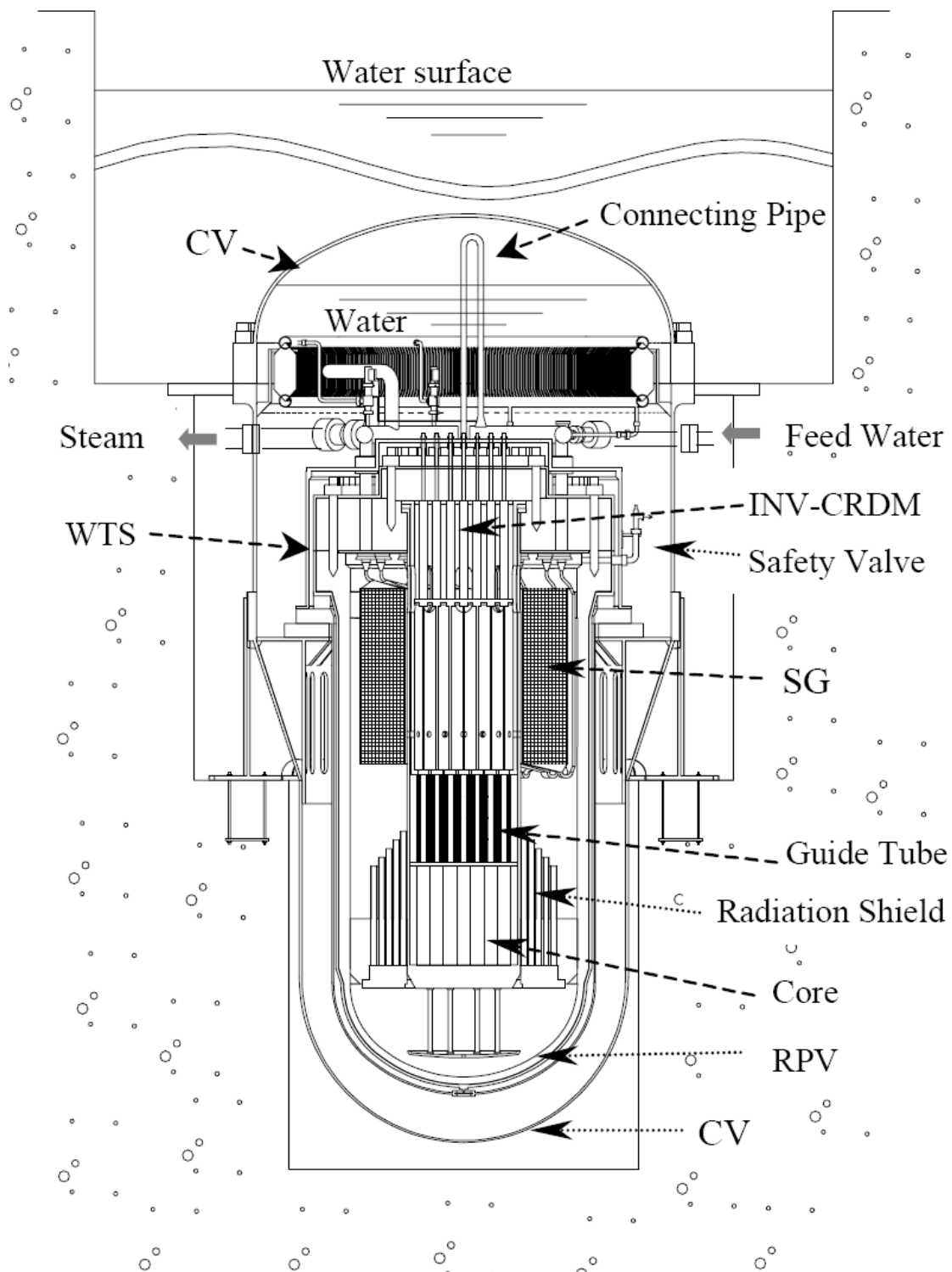


Fig. 14. Schema del primario e del contenimento

Il contenimento esterno al RPV, pieno di acqua, è mantenuto in pressione ($p < p_{RPV}$) attraverso un pressurizzatore ad atmosfera di azoto. Gli scambiatori di calore dei circuiti EDRS e l'intero RPV sono completamente sommersi.

La pressione di esercizio, rispetto agli impianti tradizionali, è stata ridotta per motivi legati agli spessori che comporterebbero un aumento dei costi, senza generare guadagni significativi tali da giustificare l'incremento degli stessi.

COMPONENTI PASSIVI E CONFINI DI SICUREZZA

Qualora si avesse un evento di LOCA, l'allagamento del nocciolo è garantito durante i primi istanti del transitorio, in modo del tutto passivo, attraverso il bilancio delle pressioni vigenti all'interno del RPV e del contenimento pieno di acqua in pressione, successivamente l'allagamento viene assicurato attraverso l'ausilio dei sistemi EDRS. L'allagamento del nocciolo è garantito, in ogni caso, senza necessità di prevedere pompe di iniezione di emergenza né accumulatori.

Il sistema EDRS è progettato per rimuovere il calore residuo di decadimento in condizioni di emergenza. Qualora si verificasse un evento incidentale (es. LOCA) il reattore viene spento, così come le pompe di alimento del circuito secondario, e si chiudono le valvole di intercettazione delle linee acqua di alimento e vapore. Una valvola idraulica, in mancanza della prevalenza fornita dalla pompa di alimentazione del circuito secondario, apre il circuito EDRS, mettendo in comunicazione gli SG, utilizzati come scambiatori di calore per la rimozione del calore prodotto dal nocciolo in condizioni di emergenza, con lo scambiatore di calore del sistema EDRS, situato all'interno del contenimento. L'aumento di pressione all'interno del contenimento, conseguente ad un evento di LOCA, può essere limitato sfruttando la condensazione del vapore primario nella stessa acqua.

Per evitare che possano aversi dissipazioni di calore, dall'interno del RPV all'acqua presente nel contenimento durante il normale funzionamento, è stata prevista un'intercapedine sigillata nella quale è normalmente presente acqua stagnante. La bassa conducibilità termica che caratterizza l'acqua fa sì che, grazie alla sola componente di conduzione, attraverso la parete del RPV si abbiano perdite inferiori all'1% della potenza termica prodotta. Tale intercapedine, alla sommità, è provvista di un tubo ad "U" che la mette in comunicazione con l'acqua del contenimento. Nella zona di curvatura (parte più alta), la tubazione, presenta un piccolo foro che consente alla stessa intercapedine di "respirare". Comunicando con il gas presente nella sommità del contenimento, per rispondere alle espansioni dovute al cambiamento delle condizioni operative del sistema, attraverso il foro si avrà passaggio di vapore/gas in una delle due direzioni, a seconda che si abbia un aumento o una diminuzione della potenza prodotta. Tale sistema consente di avere all'interno di tale intercapedine una pressione molto bassa durante l'esercizio a potenza. Nell'ambiente all'interno dell'intercapedine vige una pressione data dall'equilibrio con la pressione del sistema di contenimento in pressione, se la tubazione non fosse stata dotata dell'apposito foro, si sarebbero raggiunte condizioni di pressione decisamente più critiche ai fini del dimensionamento delle pareti della stessa intercapedine.

SISTEMI DI RISPOSTA AD INCIDENTE SEVERO

L'impianto PSRD può prevedere, in maniera opzionale, un sistema che consente la refrigerazione del RPV, dall'esterno, in caso di incidente severo, garantendo la ritenzione in-vessel (IVR – In Vessel Retention) del nocciolo fuso. Il corium riallocato sulla superficie inferiore del RPV causa un incremento di temperatura locale; quando la temperatura del vessel aumenta, un elemento di forma allungata, disposto al di sotto della faccia inferiore del vessel, a causa della dilatazione termica, si allunga provocando la rottura di un diaframma di tenuta che dà luogo all'avviamento, in modo del tutto passivo, del sistema di refrigerazione.

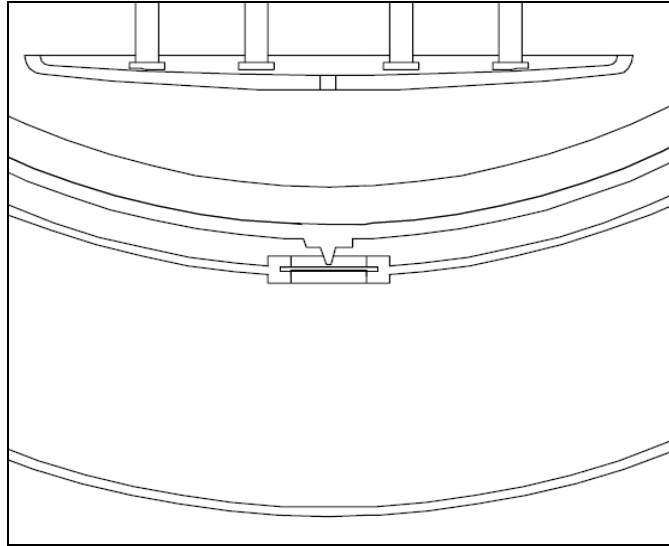


Fig. 15. Sistema IVR

Il funzionamento di tale sistema di asportazione del calore residuo di decadimento, avviene tramite la circolazione naturale di acqua presente all'interno dell'intercapedine che, a seguito della rottura del diaframma, è in connessione con l'acqua del contenimento in pressione. Dal contenimento, attraverso il diaframma, l'acqua entra nell'intercapedine dove, a contatto con la superficie esterna del RPV, si riscalda asportando il calore di decadimento prodotto dal corium. L'acqua, una volta riscaldata, grazie alla differenza di densità vigente tra la colonna calda, all'interno dell'intercapedine, e quella fredda, nel contenimento in pressione, si porta in condizioni di circolazione naturale rilasciando tale calore all'acqua del contenimento.

Tale circolazione naturale è possibile poiché nella parte alta del contenimento, in prossimità dell'uscita dall'intercapedine, è presente un apposito scambiatore di calore per il rilascio del calore all'atmosfera esterna.

IRIS (WESTINGHOUSE – INTERNAZIONALE)

DESCRIZIONE GENERALE IMPIANTO

L'impianto IRIS è stato studiato e sviluppato nell'ambito di una collaborazione tra 20 istituzioni di 9 paesi diversi e guidati da Westinghouse. Il progetto dell'impianto IRIS si basa sulla massimizzazione della difesa in profondità evitando l'accadimento di determinati eventi eliminandone le cause.

Il progetto è caratterizzato da tre diversi livelli di approccio, relativamente alla sicurezza, basati tutti sul comune criterio di progetto del "safety-by-design"¹³:

1. Il primo livello di protezione è proprio basato sul "safety-by-design" e prevede che il reattore venga progettato in modo tale da rendere impossibile gli incidenti eliminandone le cause e non attraverso una semplice attività di prevenzione. Questo primo livello di approccio vuole essere raggiunto senza prevedere l'intervento di alcun sistema.
2. Gli incidenti che non è possibile evitare, attraverso l'eliminazione delle cause in fase progettuale, sono evitati attraverso l'impiego di sistemi di protezione passivi che consentano di proteggere l'impianto.
3. Il terzo livello è caratterizzato da sistemi attivi, di tipo tradizionale, anche se questi non ricoprono nessuna funzione che sia rilevante ai fini della sicurezza.

Tab. 6. Caratteristiche principali dell'impianto

Tipo di Reattore	IPWR
Potenza [MWth] ([MWe])	1000 (335)
Arricchimento combustibile	4.95%
Tipologia di raffreddamento	Circolazione forzata
Portata primaria [kg/s]	4700
Numero SG e tipologia	8 Once Through
Pressione di esercizio [bar]	155
Temperatura ingresso/uscita [°C]	292/330
Alimento secondario [°C] / [bar]	224 / 64
Uscita secondario [°C]/[bar]	317 / 58
Pressione contenimento [bar]	2
Dimensioni RPV d/h [m]	6.21/21.3

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE PRIMARIO

Il sistema di refrigerazione primario, del quale di seguito si andranno ad analizzare nel dettaglio i diversi componenti, è caratterizzato da una struttura integrata all'interno della quale sono alloggiati gli SG e le pompe di circolazione primaria. Il RPV, di tipo integrato (Fig. 16), è progettato per avere una vita utile di 60 anni anche se, la struttura integrata che è stata adottata per il sistema, fa ritenere possibile un prolungamento della vita stessa. Infatti, la presenza di un grande quantitativo di acqua, nel downcomer all'altezza del nocciolo, fa sì che il vessel assorba una dose minore¹⁴.

GENERATORI DI VAPORE (SG)

La tipologia di SG che si è scelta di utilizzare nell'impianto IRIS è caratterizzata da tubi elicoidali poiché questi consentono di minimizzare i costi di produzione e di manutenzione oltre ad aumentare la durata di vita.

I generatori di vapore elicoidali, di tipo once-through (SG-OT – Steam Generator Once Through), sono stati utilizzati nell'impianto Superphénix e nel PWR installato sulla nave tedesca Otto-Hahn (con più di 10 anni di esercizio all'attivo). La tipologia con fascio tubiero elicoidale reagisce alle dilatazioni termiche senza eccessivi stress meccanici poiché ha grande libertà di movimento in direzione circonferenziale, senza

¹³ L'aumento della sicurezza è ottenuto da progetto attraverso opportune scelte.

¹⁴ Particolarmente critica ai fini della durata di vita del vessel è la fluenza neutronica veloce

presentare i problemi dovuti agli stress longitudinali che verrebbero ad aversi con tubi dritti. A livello prestazionale, invece, viene dopo la soluzione a tubi dritti in cui il deflusso e le condizioni di scambio termico risultano più omogenee.

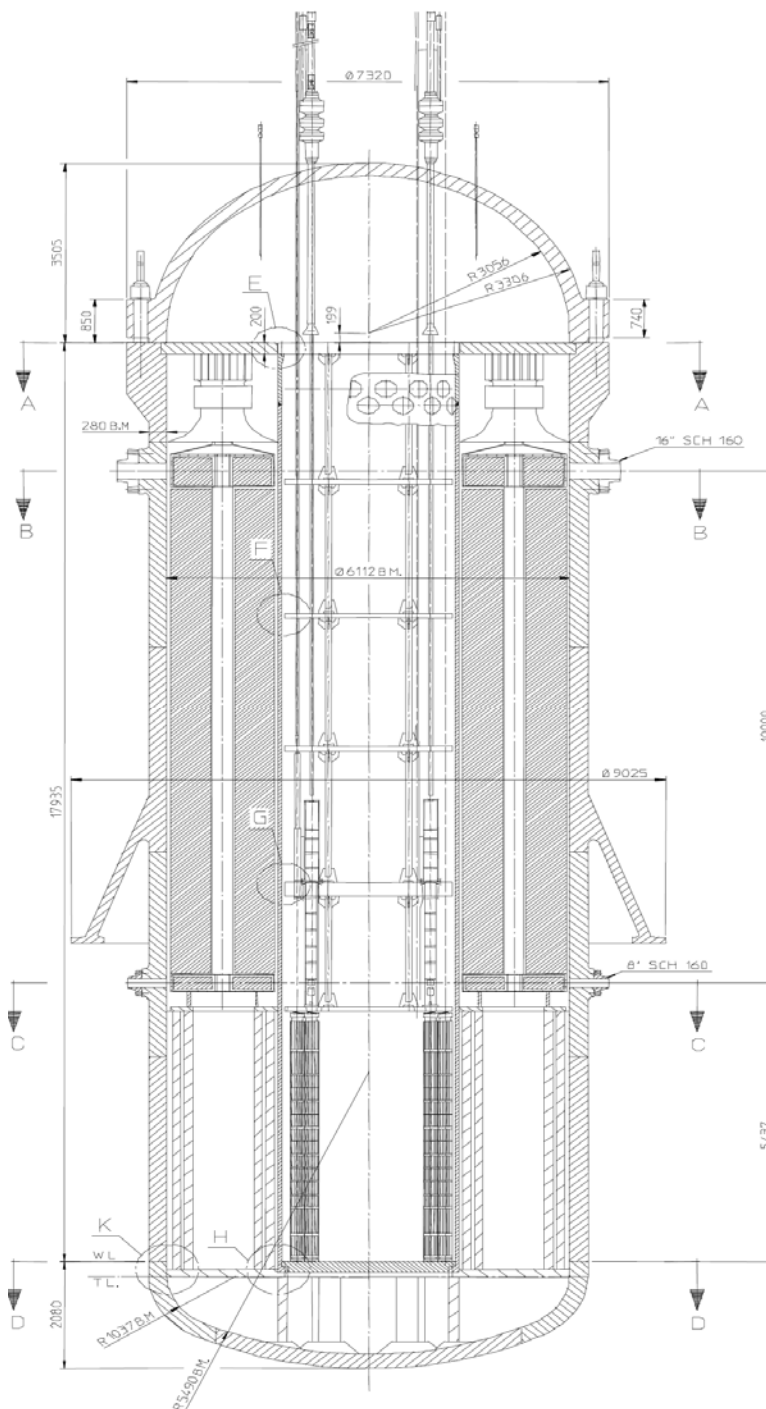


Fig. 16. RPV¹⁵ dell'impianto IRIS

L'impianto IRIS prevede 8 SG identici disposti nella zona anulare tra il barrel ed il RPV (Fig. 17). La rottura di uno SG, intesa come rottura di una tubazione del generatore di vapore (SGTR – Steam Generator Tube Rupture), non pregiudica il funzionamento delle altre unità. È comunque previsto il raggruppamento di più

¹⁵ Ipotesi progettuale iniziale dove il CRDM era previsto all'esterno del RPV, attualmente si ipotizza l'opzione con CRDM INV che presenta vantaggi legati alla riduzione delle penetrazioni di testa e all'esclusione di progetto dell'incidente di RIA dovuto all'espulsione accidentale di una barra di controllo.

unità, per limitare il numero dei componenti (ad es. valvole) da prevedere per il sistema, mantenendo necessariamente l'indipendenza meccanica e funzionale di 4 treni (possibile raggrupparli a coppie).

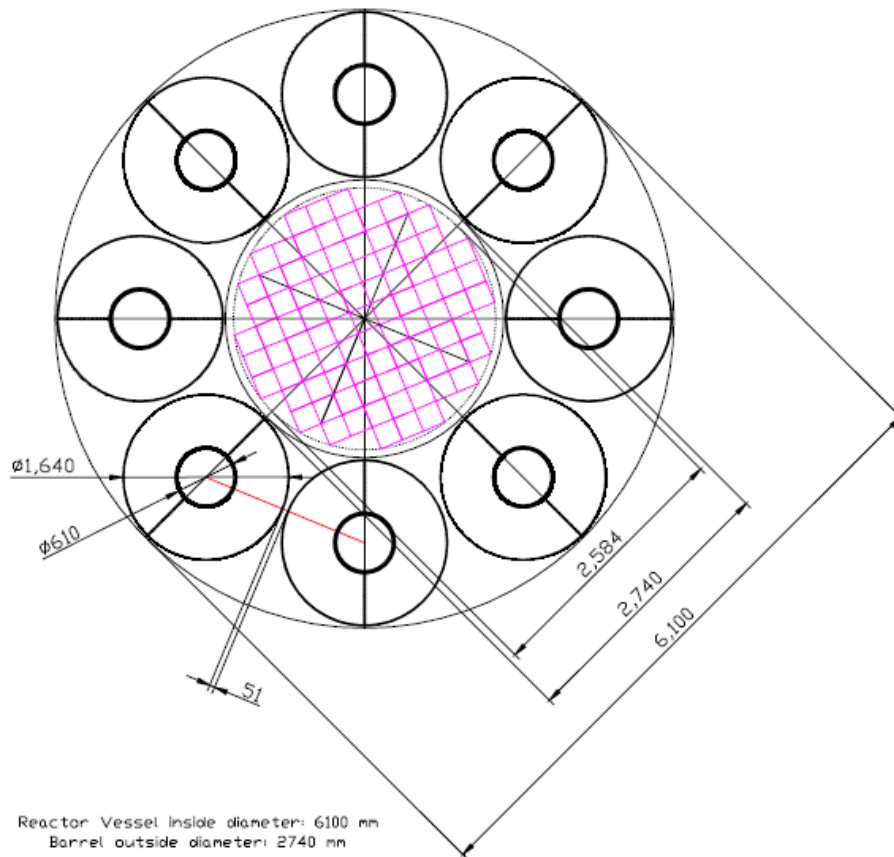


Fig. 17. Disposizione degli SG nell'impianto IRIS

La soluzione che è stata scelta per i generatori di vapore dell'impianto IRIS è l'evoluzione di uno scambiatore di calore proposto da Ansaldo per un reattore IPWR (ISIS) progettato nei primi anni '90. Questo generatore di vapore prevedeva 5 file di tubazioni, ciascuna caratterizzata da 10 tubi, con 5 rotazioni orarie e 5 antiorarie.

L'utilizzo di più SG fa sì che sia possibile ridurre la lunghezza dei tubi degli scambiatori al fine di poter utilizzare tubi commerciali senza necessità di effettuare saldature. La stessa Ansaldo propose inoltre un sistema di ispezione in servizio (ISI – In-Service Inspection) che utilizzasse ultrasuoni e tecniche di ispezione visuale.

Essendo gli SG disposti all'interno del RPV, e quindi completamente immersi nel refrigerante primario (Fig. 18), che si trova ad una pressione più elevata del secondario in condizioni di normale funzionamento, i fasci tubieri sono sottoposti globalmente a compressione piuttosto che a trazione (secondario lato tubi e primario lato mantello). La rottura, in queste condizioni, si presenta più difficilmente ed anche in tale eventualità si vengono ad avere problemi molto limitati poiché la rottura si ha per collassamento piuttosto che per esplosione. Risulta quindi altamente improbabile che si possa avere una propagazione della rottura ai tubi adiacenti. Un'effettiva mitigazione si ottiene attraverso l'isolamento dello SG guasto (o del treno).

A causa della pressurizzazione dello SG guasto, e delle rispettive linee dell'acqua di alimento e del vapore, che si verifica a seguito di un evento SGTR, le valvole di intercettazione sulle linee di alimentazione e del vapore degli SG e le stesse tubazioni sono progettate per resistere alla pressione del primario.

Caratteristica importante, degli SG-OT, è la ridotta quantità di acqua presente lato secondario; questa caratteristica risulta positiva in caso di rottura della linea vapore, poiché limita in modo automatico il raffreddamento che si avrebbe nel primario, ma risulta essere negativa (unica situazione incidentale negativa nell'IRIS) a seguito di una rottura della linea di alimentazione poiché non è in grado di mitigare gli eventi di heat-up (in questa soluzione tali eventi devono essere gestiti dal pressurizzatore).

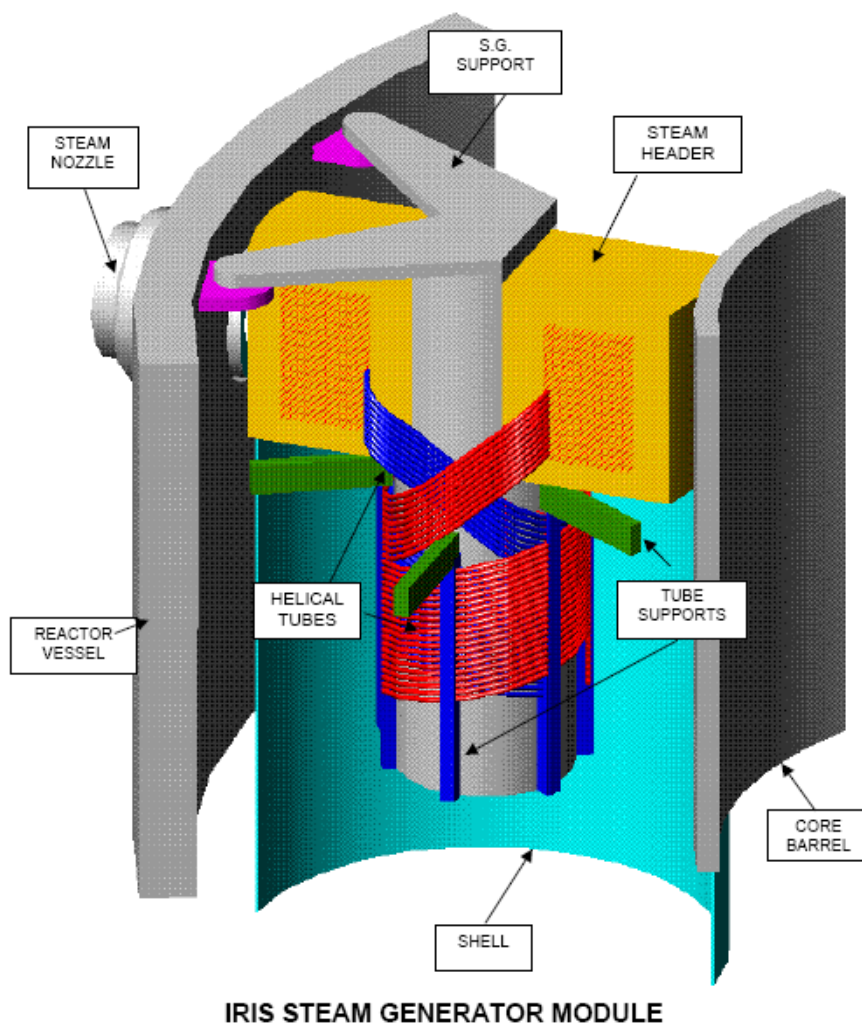


Fig. 18. Rappresentazione schematica degli SG previsti nell'impianto IRIS

POMPA PRIMARIA

La pompa primaria è di tipo "spool" (Fig. 19) ed è stata derivata da modelli utilizzati in applicazioni marine e in impianti chimici dove sono richiesti elevati flussi avendo tuttavia a disposizione ridotti volumi. La pompa "Integral Motor Propelled", sviluppata dalla Westinghouse EMD (Electro Mechanical Division), è il precursore delle attuali pompe di tipo spool. Il motore e la pompa consistono in due cilindri concentrici dove quello esterno è lo statore e quello interno il rotore. Queste pompe sono montate completamente all'interno del RPV e prevedono una sola piccola penetrazione necessaria per l'ingresso dei cavi elettrici e per le tubazioni necessarie per la refrigerazione. Si prevede di poter studiare soluzioni che permettano di eliminare anche le penetrazioni per il raffreddamento. È molto più indicata delle pompe sommerse che devono avere il motore esterno, spesso flangiato sullo stesso RPV, estendendo il confine in pressione fino al motore della pompa. Questa tipologia di pompe presenta un'elevata inerzia. La struttura nel complesso è molto compatta e si prestano bene all'utilizzo in reattori di tipo integrato; in particolare, nell'impianto IRIS, si prevede l'impiego di una pompa per ogni singolo SG.

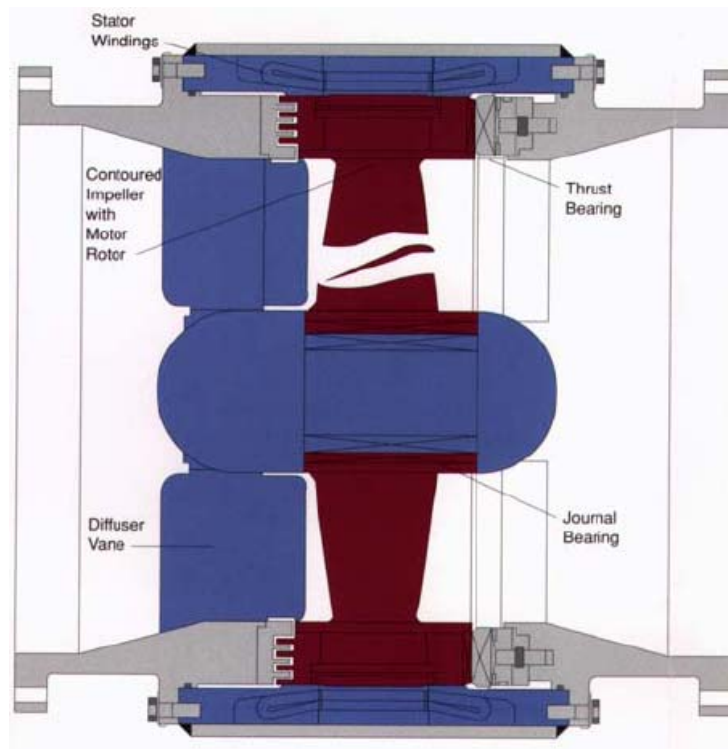


Fig. 19. Pompa Westinghouse EMD IM/P

PRESSURIZZATORE (PZR)

Il pressurizzatore previsto per questo impianto è simile a quelli a bolla di vapore comunemente utilizzati negli impianti tradizionali (Fig. 20) ma presenta caratteristiche importanti di evoluzione.

La soluzione che prevede autopressurizzazione del primario è stata esclusa poiché si vogliono avere sufficienti margini di sicurezza rispetto alle condizioni di crisi termica e perché si è voluto assicurare, prevedendo pompe nella parte superiore del primario, sufficiente battente alla sezione di aspirazione delle stesse pompe di circolazione.

La soluzione con pressurizzatore a gas è stata scartata a causa dei problemi legati all'assorbimento dell'azoto nell'acqua a temperatura più alta e rilascio, con conseguente accumulo, nelle zone caratterizzate da temperature minori del refrigerante.

La regione del pressurizzatore è isolata dal resto del RPV tramite una struttura a griglia che presenta le seguenti caratteristiche:

- Previene che la testa flangiata del RPV venga a contatto contemporaneamente con l'acqua del pressurizzatore e quella in uscita dal nocciolo riducendo gli stress termici altrimenti presenti;
- Minimizza le perdite di calore di testa e mantiene una certa quantità di acqua in saturazione;
- Funge da struttura per la strumentazione del nocciolo e per i riscaldatori del pressurizzatore;
- Consente la comunicazione tra l'acqua del primario e quella del pressurizzatore attraverso fori di comunicazione posti nella parte più bassa.

Il pressurizzatore previsto all'interno del RPV dell'impianto IRIS, caratterizzato da circa 50 m³ di volume di vapore (circa 70 m³ in totale), è molto più grande di quello dei pressurizzatori tradizionali. Pertanto, al fine di mitigare i transitori di pressione, non sono previsti i sistemi di spruzzamento generalmente necessari. I riscaldatori, presenti, sono posti nella parte più bassa del pressurizzatore, in prossimità della griglia.

Gli eventi di heat-up, come visto non mitigabili dall'inerzia termica del refrigerante presente lato secondario, vengono attenuati dall'elevato quantitativo di acqua del primario e dalle grandi dimensioni del pressurizzatore¹⁶.

¹⁶ Il rapporto tra il volume di vapore e la potenza del reattore è pari a circa 3.6 volte rispetto a quello dei PWR tradizionali e addirittura 5 volte più grande di quello previsto per l'AP1000

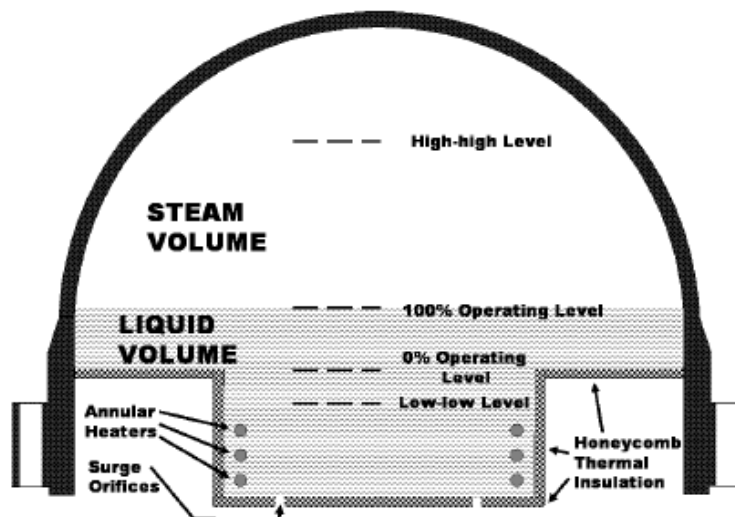


Fig. 20. Pressurizzatore dell'impianto IRIS

MECCANISMO DI MOVIMENTAZIONE DELLE BARRE DI CONTROLLO (CRDM)

Durante il progetto dell'impianto è stato sviluppato un sistema di movimentazione delle barre di controllo ad hoc. Questo CRDM, di tipo idraulico, è caratterizzato da una geometria particolare, riportata di seguito (Fig. 21). Il sistema è costituito da due cilindri concentrici caratterizzati dalle superfici di interfaccia sagomate in maniera particolare. Ciascuna delle due superfici presenta un profilo alternato tra elementi in rilievo ed elementi non in rilievo. Il reciproco movimento, possibile tra i due cilindri, fa sì che si abbiano valori di perdite di carico, differenti a seconda della reciproca posizione delle due superfici sagomate, nell'attraversamento dell'intercapedine presente tra i due cilindri coassiali. Una pompa di tipo centrifugo, che inietta l'acqua all'interno del cilindro più interno prima che la stessa attraversi l'intercapedine e poi riesca, è necessaria affinché si abbia l'uguaglianza tra la pressione al di sotto del cilindro più esterno (il pistone vero e proprio) e quella necessaria a bilanciare il peso della struttura e delle barre di controllo connesse allo stesso. In condizioni stazionarie, la perdita di carico attraverso il profilo periodico, tra le superfici del cilindro e del pistone, è uguale alla pressione che garantisce l'equilibrio.

Per semplificare la strategia di controllo, la pompa opera ad un numero fisso di giri e per le operazioni di movimentazione del pistone, e quindi delle barre di controllo ad esso connesse, è necessario che la pompa fornisca una maggiore prevalenza che, in stati stazionari, viene dissipata attraverso una valvola posta in serie alla pompa stessa.

Il coefficiente di perdita di carico attraverso il profilo sagomato, già descritto in precedenza, è una funzione caratterizzata da un andamento di tipo periodico dipendente della posizione reciproca di pistone e cilindro. Una rappresentazione tipica, relativa ad un piccolo intervallo, è riportata di seguito (Fig. 22 e Fig. 23).

Il massimo valore delle perdite di carico si ha quando il profilo interno del cilindro e quello esterno del pistone sono completamente accoppiati.

Differenti stati di equilibrio possono essere raggiunti e mantenuti operando semplicemente sulla valvola di tenuta. Riferendosi alla posizione (C), un aumento nella perdita di carico attraverso la valvola di tenuta porta in generale ad una diminuzione del flusso all'interno del circuito che causa quindi una riduzione della pressione di equilibrio (pressione che sostiene le barre di controllo). Quindi il pistone dovrà spostarsi in una nuova posizione di equilibrio corrispondente ad un aumento del coefficiente di perdita di carico attraverso il profilo. Questo porta necessariamente ad un abbassamento delle barre di controllo fino al raggiungimento di una posizione in cui si abbia nuovamente l'uguaglianza tra la pressione di equilibrio e le perdite di carico attraverso il profilo, tale transitorio si traduce in un abbassamento delle barre verso la nuova posizione di equilibrio (D).

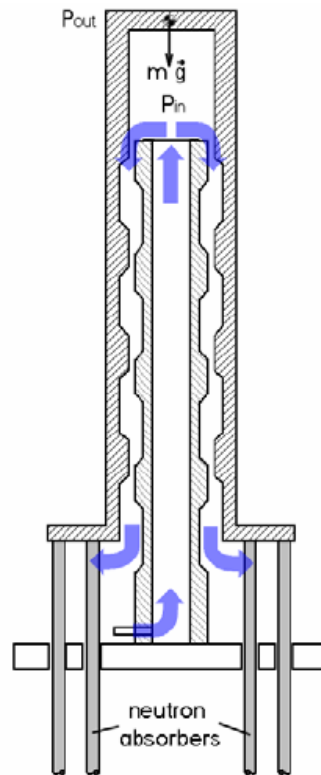


Fig. 21. CRDM idraulico, profilo studiato per l'impianto IRIS

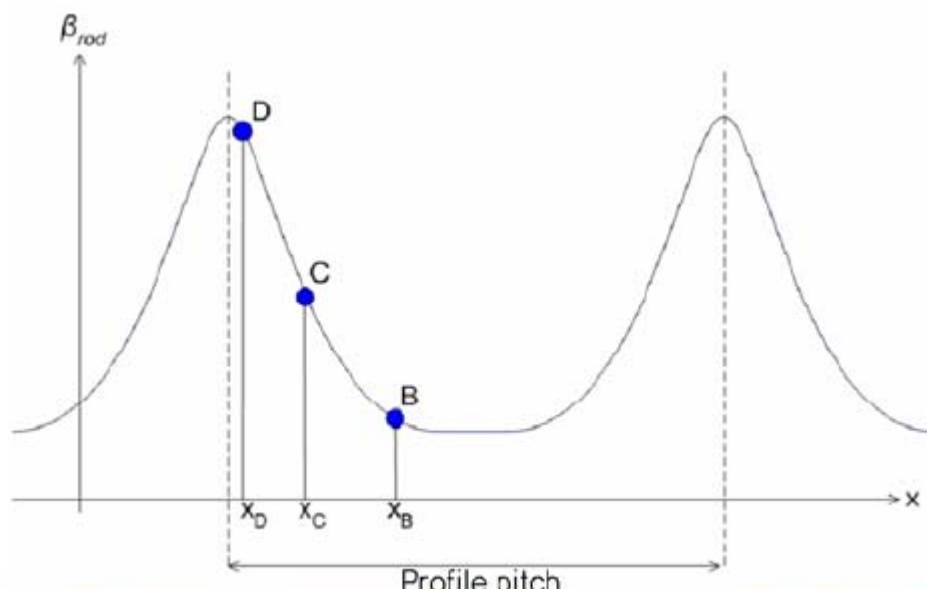


Fig. 22. Andamento del coefficiente di perdita di carico in funzione della posizione delle barre

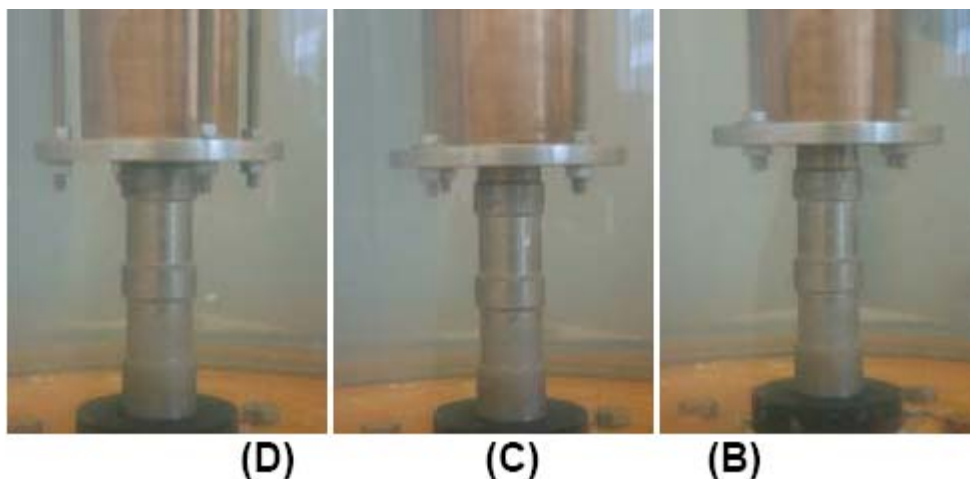


Fig. 23. Posizioni relative al diagramma precedente

In modo del tutto analogo, aprendo la valvola di tenuta, e riducendo la perdita di carico attraverso la stessa, il flusso nel circuito aumenta così come la pressione di equilibrio, traducendosi in un'estrazione della barra di controllo fino ad un nuovo punto di equilibrio (B) dove, la pressione di equilibrio e la perdita di carico attraverso il profilo, sono nuovamente uguali. Il sistema di comando e controllo, con riferimento ad un singolo blocco di barre di controllo, è schematizzato di seguito (Fig. 24).

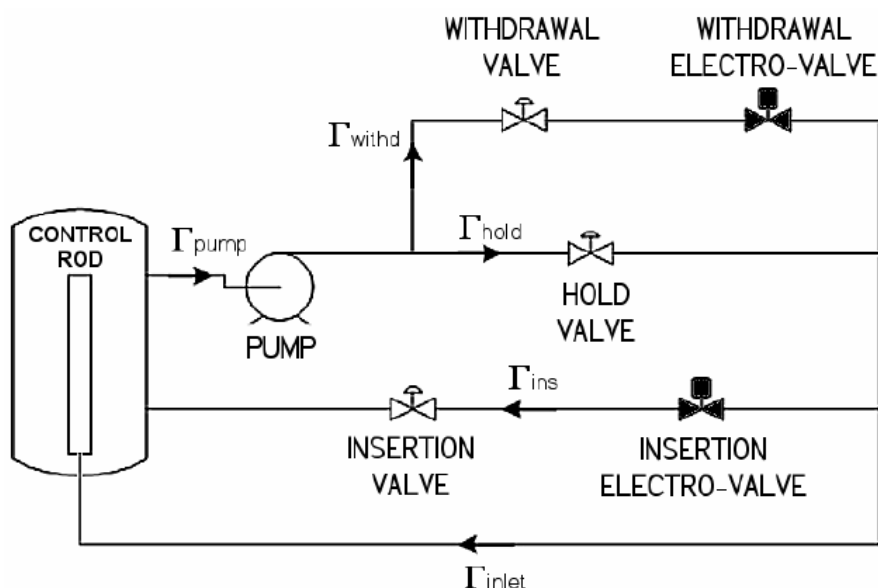


Fig. 24. Schema di comando e controllo del CRDM idraulico

Per estrarre le barre di uno step è necessario ridurre la dissipazione attraverso la valvola di tenuta in modo da aumentare il flusso e quindi la pressione rispetto al valore di equilibrio. Questo può essere ottenuto attraverso l'apertura di un circuito parallelo riducendo in questo modo la perdita di carico. Un'elettro-valvola di estrazione, normalmente chiusa, viene aperta per un tempo prefissato per ottenere l'estrazione di uno step. Analogamente, per ottenere l'inserimento, viene aperta la valvola di inserimento che consente di aumentare il flusso nella seconda parte del circuito generando maggiori perdite di carico attraverso la valvola di tenuta e quindi conseguente riduzione della pressione di equilibrio che si trasforma in un inserimento delle barre di controllo.

Tale meccanismo è dotato di un sistema di rilevazione della posizione delle barre montato alla sommità delle stesse per registrare gli spostamenti durante le operazioni di inserimento ed estrazione.

PROGETTO DELLA SICUREZZA

Viene eliminato di progetto il LBLOCA poiché, essendo stati eliminati i loop, non sono più presenti tubazioni di grande diametro come nei PWR tradizionali. L'adozione di un IPWR richiede un vessel più grande comparato a quello di un PWR attuale. Presenta altezza elevata data dalla somma del nocciolo, degli SG e delle pompe, grazie a questa caratteristica si ha nel primario un grande quantitativo di refrigerante che aiuta il sistema a rispondere a piccoli e medi LOCA. La logica con cui è stato progettato IRIS punta a ridurre gli effetti prevenendo, piuttosto che mitigando successivamente tramite operazioni di reintegro, caratteristica che sposa pienamente la strategia del safety-by-design.

Il grande quantitativo di acqua primaria conferisce maggiore inerzia termica al sistema in risposta a transitori che, come già detto, non possono essere assorbiti dal refrigerante secondario poiché, in generatori di vapore once-through, è in quantità molto limitata. La struttura consente una facile instaurazione della circolazione naturale con grande capacità del sistema nella rimozione del calore di decadimento residuo dal nocciolo. Inoltre l'elevata altezza del RPV consente di ipotizzare l'utilizzo di un meccanismo di movimentazione delle barre di controllo all'interno del RPV.

La grande superficie di scambio termico che caratterizza gli SG all'interno del RPV è utilizzata per la rimozione del calore dal nocciolo durante gli eventi incidentali e fornisce, al sistema, un mezzo per effettuare la depressurizzazione del primario attraverso la condensazione del vapore che viene ad essere presente all'interno del RPV. Seguendo la stessa logica precedentemente citata, questa soluzione, a differenza di quelle utilizzate nei PWR tradizionali, consente di attuare la depressurizzazione attraverso la condensazione piuttosto che attraverso il rilascio, ovvero perdita, di massa di refrigerante primario all'esterno del RPV.

SISTEMI DI SICUREZZA PASSIVI

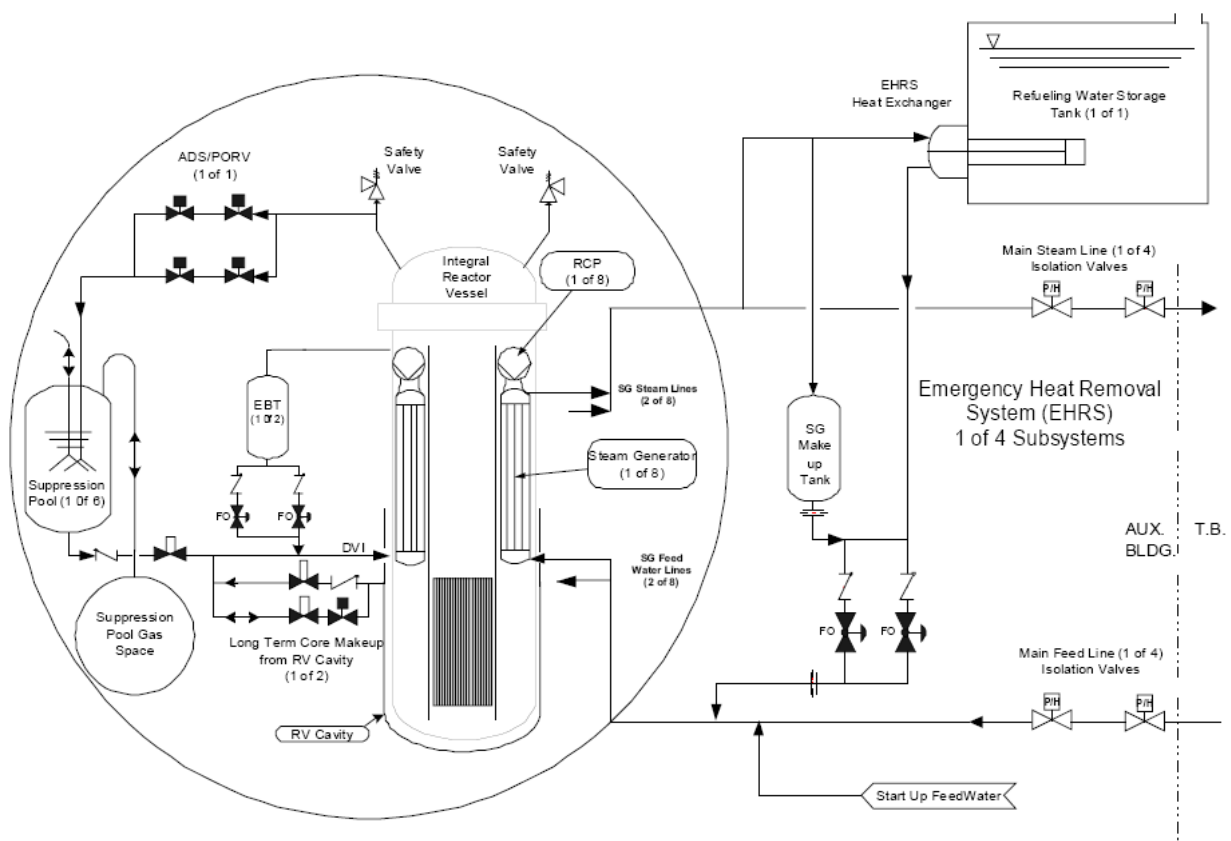


Fig. 25. Sistemi di sicurezza passivi previsti per l'impianto IRIS

SISTEMA DI RIMOZIONE DEL CALORE DI DECADIMENTO RESIDUO (EHRS)

Il sistema di asportazione del calore di decadimento residuo è composto da quattro treni indipendenti ciascuno caratterizzato da uno scambiatore di calore orizzontale con tubi ad "U" disposto all'interno della

piscina contenente l'acqua per il refueling RWST (RWST-Refueling Water Storage Tank) che è posizionata al di fuori del contenimento in pressione. Ciascuno dei 4 scambiatori di calore è connesso con il corrispondente SG (o coppia) attraverso una delle 4 linee vapore/alimentazione.

La RWST svolge la funzione di pozzo freddo per gli scambiatori di calore del sistema EHRS, il limite di tale sistema è la presenza di una sola piscina nella quale viene rilasciato, da tutti e quattro i sistemi che sono tra loro indipendenti, il calore di decadimento asportato dall'interno del RPV. Pertanto, seppur con probabilità pressoché nulla, la rottura della piscina rappresenta un modo comune di guasto.

Il sistema EHRS opera in circolazione naturale rimuovendo il calore dal primario e rilasciandolo nella piscina RWST. Nell'eventualità di un evento di LOCA gli SG si scoprono ed i sistemi EHRS depressurizzano il RPV passivamente, senza bisogno di avere ulteriore perdita di refrigerante primario, attraverso la condensazione del vapore presente all'interno del vessel. Tramite il sistema EHRS, l'impianto IRIS, mantiene invariata la quantità di refrigerante primario e attraverso la condensazione del vapore cede il calore di decadimento residuo alla piscina RWST. Depressurizzando il sistema viene limitato il flusso che fuoriesce dalla rottura, successivamente, l'asportazione di calore attraverso l'EHRs contribuisce alla depressurizzazione dell'intero sistema (RPV+CV).

In questo impianto, il sistema EHRS copre le funzioni dei sistemi di rimozione del calore residuo di decadimento e di depressurizzazione del contenimento.

CONTENIMENTO IN PRESSIONE

Il contenimento in pressione è caratterizzato da una struttura sferica in pressione con diametro di 25 m e spessore di circa 4.5 cm. La pressione massima di progetto prevista per il contenimento è di 1.4 MPa, mentre quella durante il normale esercizio è di 0.2 MPa. All'interno dello stesso contenimento sono previsti sistemi per l'abbattimento della pressione durante i transitori incidentali (piscina di soppressione).

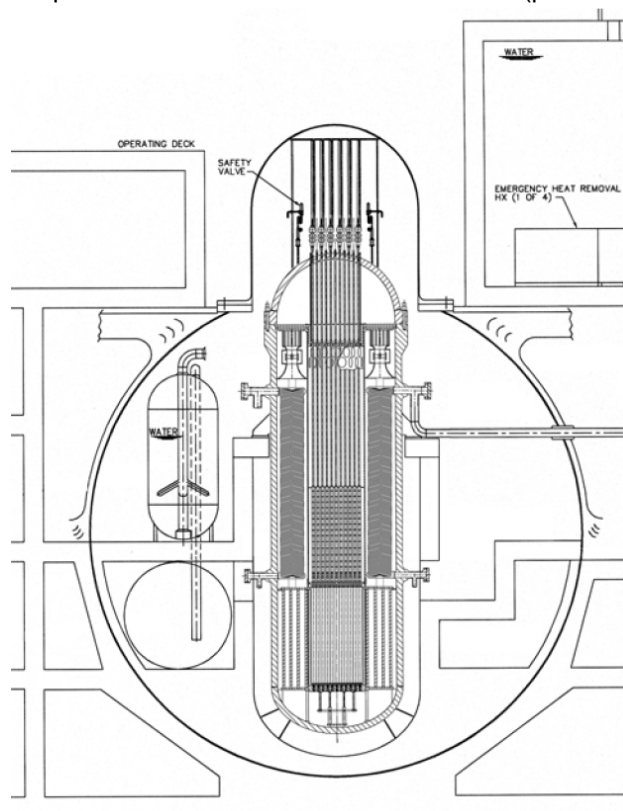


Fig. 26. Struttura del contenimento in pressione

SISTEMA PER LA DEPRESSURIZZAZIONE AUTOMATICA (ADS)

Lo ADS è un piccolo sistema di depressurizzazione automatica situato nella parte superiore del pressurizzatore dove è presente il vapore e aiuta l'EHRs a depressurizzare il RPV quando, e se, il quantitativo di refrigerante primario scende al di sotto di un certo set-point. L'ADS è costituito da uno stadio e

consiste in 2 linee parallele da circa 10 cm ciascuna con 2 valvole di chiusura. Ciascuna linea scarica nei serbatoi (ne sono presenti 6) della piscina di soppressione della pressione. Questo sistema garantisce che il RPV e il CV siano depressurizzati in modo da ridurre le perdite di refrigerante primario.

SERBATOI PER L'ACQUA BORATA (EBT)

Sono presenti due serbatoi, contenenti circa 13 m³ di acqua borata in pressione, che possono collaborare, seppur limitatamente, al reintegro dell'acqua primaria, all'interno del RPV. Attraverso una connessione diretta con il vessel (DVI – Direct Vessel Injection) iniettano l'acqua fortemente borata che costituisce un mezzo aggiuntivo per garantire lo spegnimento del reattore.

SISTEMA DI SOPPRESSIONE DELLA PRESSIONE DEL CONTENIMENTO (CPSS)

Il sistema è costituito da sei serbatoi di acqua ed uno ulteriore per i gas non condensabili, comune a tutti.

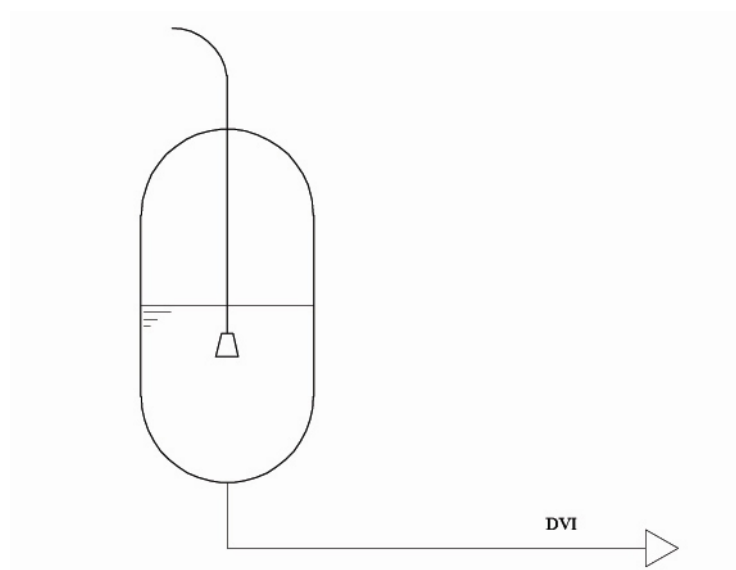


Fig. 27. Schematizzazione del sistema DVI

Dallo schema riportato si vede il breve tratto di tubazione che mette in comunicazione ciascuno dei 6 serbatoi con l'ambiente del contenimento attraverso uno sparger sommerso. Tale sistema consente di abbattere la pressione del contenimento facendovi condensare il vapore eventualmente presente a seguito di un evento incidentale di LOCA o della rottura di una linea dell'acqua di alimento o del vapore.

Utilizzando la DVI è anche possibile, attraverso lo stesso CPSS, iniettare acqua all'interno del RPV per garantire l'allagamento del nocciolo.

CAVITÀ REATTORE

Nella zona attorno al RPV, nella parte inferiore dello stesso, è presente un volume in cui si accumula refrigerante a seguito di perdite o di condensazione del vapore presente nel contenimento. Durante un evento di LOCA la cavità reattore si allaga e l'accumulo di acqua fa sì che si abbia un certo battente che consente di iniettare acqua tramite la DVI al nocciolo, mantenendolo allagato.

ANALISI DI ALCUNI TRANSITORI INCIDENTALI

PERDITA DEL REFRIGERANTE PRIMARIO (LOCA)

La penetrazione più grande nel RPV ha un diametro inferiore a circa 10 cm e pertanto, di progetto, viene escluso l'incidente di LBLOCA. Come già detto, la filosofia del progetto IRIS mira, a seguito di eventi incidentali, al mantenimento della quantità di acqua piuttosto che al reintegro della stessa, sia che questo venga fatto attraverso sistemi attivi che passivi.

L'allagamento del nocciolo, in seguito a qualsiasi evento incidentale, è assicurato da tre fattori:

1. Grande quantitativo di acqua presente nel RPV;
2. Il sistema EHRS rimuove il calore direttamente dall'interno del RPV consentendo di depressurizzare il sistema attraverso la condensazione del vapore piuttosto che attraverso il rilascio di refrigerante all'esterno del RPV;
3. Il sistema di contenimento (CV – Containment Vessel), di piccole dimensioni, consente di raggiungere dopo un breve transitorio l'equilibrio tra la pressione del RPV e del CV, tale equilibrio porta all'interruzione della fuoriuscita del refrigerante dal primario (adottando un contenimento di maggiori dimensioni si sarebbe avuto un transitorio più duraturo per raggiungere l'equilibrio, ma la pressione di equilibrio sarebbe risultata più bassa).

Dopo che si è verificato l'evento di LOCA, a seguito del rilascio di massa nel contenimento, la pressione nel RPV diminuisce mentre quella nel CV aumenta. La sequenza di mitigazione dell'incidente inizia con l'arresto delle pompe e del reattore. Il sistema EBT è avviato per fornire boro mentre il sistema EHRS effettua la depressurizzazione del primario attraverso la condensazione del vapore sugli SG. Alla fine della fase di abbattimento della pressione il RPV e il CV raggiungono la stessa pressione, pari a circa 0.8 MPa. A questo punto diventa disponibile, per poter essere iniettata all'interno del RPV per gravità, l'acqua borata presente all'interno della piscina di soppressione. Il sistema costituito dal RPV e dal CV, diventato un sistema unico a causa della comunicazione presente tra i due volumi, viene depressurizzato dal sistema EHRS dall'interno del RPV e pertanto il flusso di refrigerante attraverso la rottura si inverte. L'acqua viene fornita dai serbatoi del CPSS e il livello del refrigerante all'interno del RPV aumenta. Diminuendo la pressione nel contenimento, parte dell'acqua presente nei serbatoi della piscina di soppressione è spinta fuori nel CV e prende parte all'allagamento della cavità reattore. Eventualmente il sistema completo, formato dal RPV e dal CV, può essere portato ad una pressione inferiore a 0.2 MPa in meno di 12 h.

Durante la fase di raffreddamento a lungo termine il RPV ed il CV hanno la pressione che cala lentamente, in questa fase di recupero dall'incidente è disponibile, se richiesta, acqua borata che può essere iniettata per gravità dalla piscina di soppressione e dalla cavità reattore. Il flusso attraverso la rottura sarà dipendente dalla rimozione del calore dal CV.

ROTTURA DI UNA TUBAZIONE DEL GENERATORE DI VAPORE (SGTR)

Grazie alla particolare struttura, già vista in precedenza, i tubi degli SG sono soggetti a sforzi di compressione, comunque sia i fasci tubieri che le piastre di testa sono progettati per resistere alla pressione del primario dall'esterno. In questo modo la rottura è molto improbabile e la propagazione del guasto è praticamente impossibile. Ovviamente anche le tubazioni vapore ed acqua di alimento, oltre che le valvole di intercettazione, sono progettate per resistere alla pressione del primario. Una volta chiusa la valvola di intercettazione l'acqua del primario pressurizza lo SG guasto e la perdita di refrigerante si arresta quasi subito a causa del ridotto volume che caratterizza gli SG lato secondario, questo si traduce nella non necessità di prevedere iniezione di refrigerante nel primario per supplire alla fuoriuscita.

AUMENTO DELLA RIMOZIONE DEL CALORE DAL PRIMARIO

Esistono diversi eventi incidentali che possono portare ad avere un aumento della rimozione del calore dal primario:

1. La rottura della linea vapore non genera aumento dell'asportazione del calore poiché si limita ad un solo SG. La limitata quantità di acqua nello SG limita il deflusso nel contenimento e con opportuno isolamento della linea di alimentazione, la rimozione di calore che ne risulta è limitata.
2. Un'eventuale rimozione eccessiva di calore dal primario, grazie all'elevata lunghezza del down-comer, è caratterizzata da un grande tempo di grazia ed il sistema deve intervenire (spegnimento del reattore) prima che si venga ad avere un aumento della potenza a causa dell'overcooling del primario.
3. Il sistema EHRS, se attivato con reattore a potenza, asporterebbe circa il 15% della potenza prodotta, questo comporterebbe un eccessivo abbassamento della temperatura del refrigerante primario con conseguente aumento della potenza. Il progetto, che prevede l'utilizzo della stessa tubazione per il circuito secondario e per il sistema EHRS, fa sì che l'avviamento di quest'ultimo si possa avere esclusivamente dopo la chiusura del primo.

DIMINUIZIONE DELL'ASPORTAZIONE DEL CALORE DAL LATO SECONDARIO

In seguito a questi eventi si ha un'improvvisa riduzione del quantitativo di calore asportato dagli SG che causa l'aumento della temperatura del refrigerante primario, la conseguente espansione termica dello stesso e l'aumento della pressione. Le valvole di sicurezza sono dimensionate per proteggere il sistema reattore da questi eventi di sovrappressione. Anche in assenza del pozzo di calore, avviato lo EHRS, la rimozione del calore di decadimento porta il sistema in condizioni di sicuro spegnimento.

Il grande quantitativo di acqua, che caratterizza il primario, consente di ottenere un aumento limitato della temperatura del refrigerante. Inoltre, la grande dimensione del pressurizzatore garantisce un ulteriore margine all'apertura delle valvole.

Questo incidente si può presentare in seguito a:

- Perdita del carico esterno
- Perdita di alimentazione elettrica (esclusa quella di emergenza) e perdita di acqua agli SG
- Rottura della tubazione dell'acqua di alimento

RIDUZIONE DEL FLUSSO DI REFRIGERANTE (LOFA)

Gli eventi possibili (considerati) che possono portare ad una riduzione del flusso di refrigerante primario e quindi della capacità di asportazione del calore sono:

- Perdita completa del flusso forzato di refrigerante primario;
- Grippaggio di una pompa di circolazione del primario

Tali eventi generano un'improvvisa riduzione del quantitativo di calore asportato a causa della riduzione del flusso di refrigerante. Se il reattore è a potenza, in seguito ad uno di questi eventi, si registra un aumento di temperatura a cui può seguire il raggiungimento delle condizioni di flusso termico critico; è quindi possibile avere danneggiamento del combustibile se non si provvede all'immediato spegnimento del reattore. Le protezioni devono arrestare il reattore prima che si possa avere danneggiamento del combustibile.

Perdita completa del flusso forzato

Una condizione peggiore, rispetto alla riduzione del flusso primario è quella della perdita completa del flusso che si può avere qualora si abbia perdita di alimentazione elettrica. A questo evento segue l'arresto di tutte le otto pompe primarie che danno luogo ad una perdita del flusso primario. I segnali per i quali i sistemi di protezione del reattore comandano lo spegnimento dell'impianto sono:

- Condizione di alimentazione delle pompe in sottovoltaggio (bassa frequenza o bassa velocità)
- Basso flusso di refrigerante primario

Grippaggio pompa

La condizione di grippaggio di una pompa di circolazione è un incidente che porta all'istantaneo arresto della stessa, quindi il flusso, attraverso la pompa rotta e lo SG ad essa annesso, si riduce annullandosi pressoché istantaneamente causando lo spegnimento del reattore su segnale di basso flusso.

A seguito dello spegnimento si presenta comunque la necessità di smaltire il calore residuo prodotto dal nocciolo che, a causa della ridotta capacità di asportazione del calore si è portato ad una temperatura maggiore. Il refrigerante primario si espande, entra più liquido nel pressurizzatore ed il volume occupato dal vapore si riduce. Durante questo transitorio non è prevista l'apertura delle valvole di sicurezza del pressurizzatore, anche se la pressione tende ad aumentare.

L'impianto IRIS presenta otto pompe di circolazione primaria ma è caratterizzato da una potenza pari a circa 1/3 di quella di un PWR tradizionale. Il transitorio legato al grippaggio di una sola pompa è pertanto meno importante. Grazie a questa sua peculiarità, nel caso di grippaggio di una pompa, non si raggiunge la condizione di DNB anche nel caso in cui non si avesse la richiesta da parte del sistema di protezione del reattore, di procedere con lo spegnimento.

ANOMALIE NELLA DISTRIBUZIONE DELLA REATTIVITÀ

Gli eventi che possono portare ad anomalie nella distribuzione della reattività sono molteplici, in particolare si riportano di seguito:

- Estrazione incontrollata di una barra di controllo in condizioni di sotto-criticità o in fase di avviamento;

- Estrazione incontrollata di una barra di controllo nel funzionamento a potenza;
- Errato allineamento delle barre di controllo;
- Malfunzionamento del CVCS con conseguente diluizione del boro;
- Caricamento di una barra di combustibile in posizione errata;
- Control Rod Ejection;

L'ultimo evento è stato eliminato da progetto (CRDM previsto all'interno del RPV) per gli altri eventi incidentali, date le numerose analogie con impianti PWR tradizionali ci si attende che il sistema abbia risposte analoghe a quelle di tali impianti non essendoci state sostanziali modifiche nei sistemi utilizzati.

AUMENTO DEL QUANTITATIVO DI REFRIGERANTE PRIMARIO

Evento non possibile dal momento che IRIS non prevede sistemi di iniezione ad alta pressione. L'inavvertita apertura di un serbatoio con acqua borata, date le ridotte dimensioni di quest'ultimo, è tranquillamente ammortizzata dalle grandi dimensioni del volume di vapore presente nel pressurizzatore.

ANALISI DEI SISTEMI DI RISPOSTA AD INCIDENTE SEVERO

L'impianto IRIS è progettato per aver un sistema di ritenzione in-vessel del nocciolo fuso assicurando che il RPV venga depressurizzato e refrigerato dall'esterno.

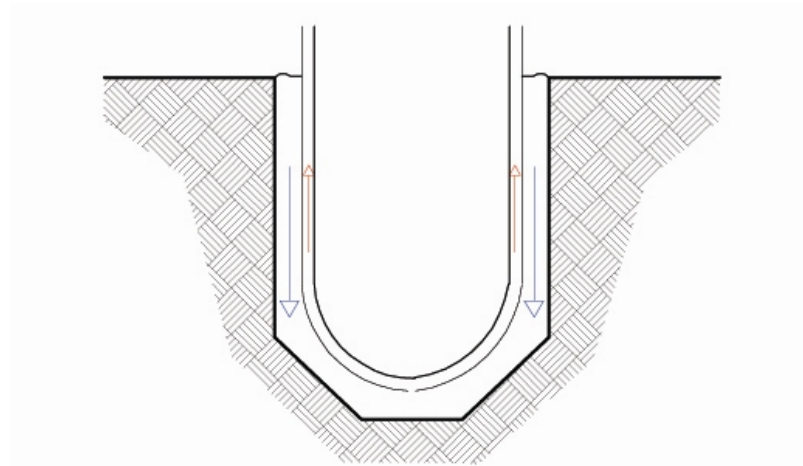


Fig. 28. Sistema di refrigerazione del RPV dall'esterno

La parte inferiore del RPV è alloggiata in una cavità che, in seguito ad ogni evento che possa mettere in pericolo l'integrità del nocciolo, viene allagata. Il RPV è ricoperto da un isolamento esterno che forma un passaggio anulare tra l'isolamento e la superficie esterna del RPV. Durante gli eventi incidentali si instaura un flusso che, per circolazione naturale, asporta calore dalla superficie del RPV. Tale flusso procede verso l'alto, nella zona anulare dove si ha movimento di acqua riscaldata e del vapore prodotto, e verso il basso, dopo aver condensato all'esterno dell'isolamento, mantenendo sempre allagata la cavità reattore. Test effettuati sull'analogo sistema previsto per l'AP1000 dimostrano che il calore asportato in questo modo è sufficiente ad evitare che il corium attraversi il RPV; poiché il sistema in esame è un reattore integrato, caratterizzato da minore potenza da asportare e superficie di scambio maggiore, ci si attende un comportamento complessivamente migliore.

KLT-40C (RUSSIA)

DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

Il reattore KLT-40C è caratterizzato da una struttura modulare ed è stato sviluppato al fine di utilizzare gli stessi reattori, impiegati sulle navi rompighiaccio, installandoli su piattaforme galleggianti.

La finalità degli impianti galleggianti è di produrre energia elettrica e calore in zone remote (di particolare interesse per la Russia date le caratteristiche geografiche del paese).

Le caratteristiche principali di questo reattore possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Assenza di lunghe tubazioni per il circuito primario, SG e pompe di circolazione sono connesse direttamente al RPV attraverso bocchelli appositi.
- La struttura è analoga a quella di un reattore con quattro loop.
- Gli SG sono di tipo "once-through" e sono previsti all'esterno del RPV.
- Il pressurizzatore è a gas.

L'impianto su piattaforme galleggianti è dotato di due reattori; ciascuna unità reattore è collocata in un contenimento a tenuta progettato per evitare propagazione di radioattività in ambiente e limitando la zona in cui sono presenti prodotti di fissione a seguito di un ipotetico evento di LOCA.

Gli impianti su piattaforme galleggianti si prevede che vengano utilizzati in zone remote per la produzione di energia elettrica e calore, quest'ultimo necessario per i processi di dissalazione dell'acqua di mare. Altre possibilità di impiego sono relative alla possibilità di fornire la necessaria alimentazione a piattaforme off-shore di estrazione di combustibili fossili che si trovano in zone marine remote.

Tab. 7. Caratteristiche impianto

Tipo di Reattore	PWR
Potenza [MWth] ([MWe])	150 / 35
Tipologia di raffreddamento	Circolazione forzata
Numero SG e tipologia	4 Once Through OUTV
Pressione di esercizio [bar]	127
Temperatura ingresso/uscita nocciolo [°C]	279/317
Alimento secondario [°C]	170
Uscita secondario [°C]/[bar]	290 / 37.3

RPV

Il RPV è di tipo tradizionale come quelli generalmente utilizzati per soluzioni a loop. Come visibile in figura (Fig. 29) non sono presenti veri e propri loop ma connessioni dirette al RPV attraverso gli appositi bocchelli. I loop vengono a crearsi internamente grazie alle apposite connessioni che permettono di avere all'interno di ciascun bocchello, contemporaneamente e in zone distinte, il deflusso in entrambi i versi, (sistema basato su una configurazione tipo tubi concentrici). La riduzione della lunghezza delle tubazioni primarie e del diametro, consentono di avere minori probabilità di avere eventi di LOCA e delle conseguenze annesse.

GENERATORI DI VAPORE (SG)

Gli SG previsti per questo impianto sono di tipo once-through, il refrigerante primario defluisce lato mantello mentre il secondario all'interno dei tubi, e sono disposti all'esterno del RPV cui sono connessi direttamente attraverso i bocchelli (Fig. 32). Il fascio tubiero all'interno degli SG è sottoposto principalmente a compressione e presenta quindi ridotta probabilità di fallimento (SGTR). Le tubazioni del secondario sono utilizzate dal sistema di asportazione del calore di decadimento residuo in condizioni di emergenza per asportare il calore dal refrigerante primario. Tale soluzione consente di minimizzare anche le penetrazioni che si hanno all'interno del confine in pressione del circuito primario, riducendo le zone caratterizzate da discontinuità e quindi maggiore possibilità di rottura.

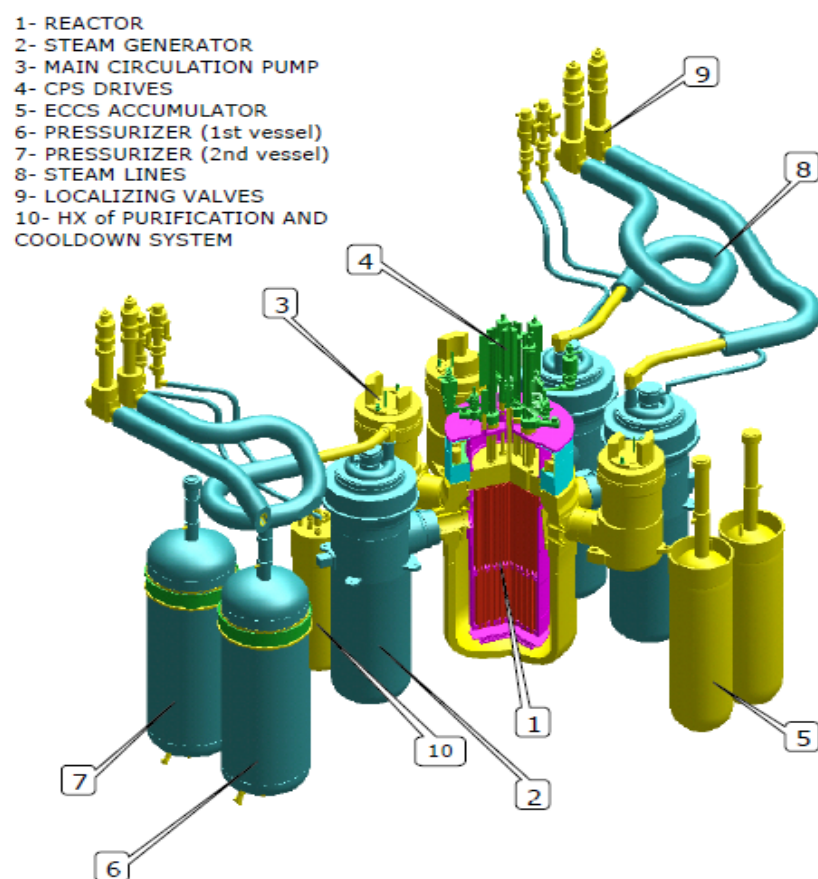


Fig. 29. Struttura reattore KLT-40C

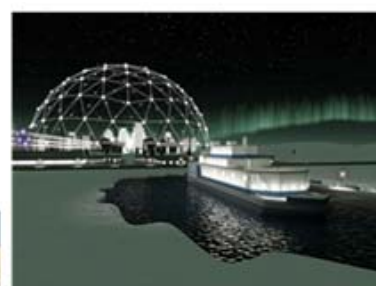


Fig. 30. Possibili applicazioni per gli impianti nucleari installati su piattaforme galleggianti

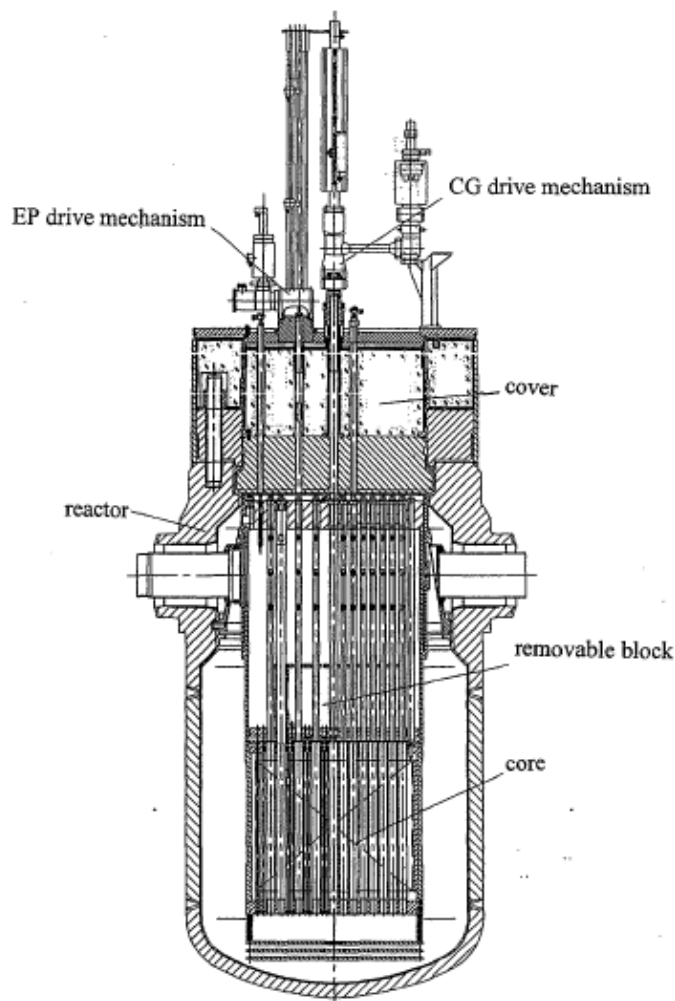


Fig. 31. RPV del reattore KLT-40C

SISTEMI DI SICUREZZA PASSIVI

L'impianto, che prevede l'utilizzo del reattore KLT-40C è una diretta evoluzione di quello che prevedeva l'impiego del reattore KLT-40. Tale evoluzione ha portato all'aggiunta di sistemi che in precedenza non erano stati previsti, i nuovi sistemi sono riportati in rosso nello schema seguente (Fig. 33). È stato inserito un sistema di rimozione del calore di decadimento residuo di tipo attivo e, in caso di fallimento dello stesso, sono previsti 4 treni EHRS passivi. Tale sistema presenta delle valvole di intercettazione che devono essere aperte a seguito di un apposito segnale, all'apertura delle valvole segue il funzionamento passivo del sistema di asportazione del calore.

SISTEMA DI RIMOZIONE DEL CALORE DI DECADIMENTO RESIDUO (EHRS)

Il sistema EHRS passivo è previsto per la rimozione del calore residuo di decadimento nel caso in cui si abbia blackout dell'impianto ed il fallimento del sistema attivo di rimozione del calore di decadimento residuo. Il sistema è caratterizzato da due canali, ciascuno costituito di due loop per la rimozione del calore. La capacità di asportazione del calore di un singolo loop, circa 1% della potenza nominale, è sufficiente a mantenere il nocciolo refrigerato e la pressione del sistema all'interno dei limiti di progetto (in condizione di reattore sottocritico, dopo lo spegnimento).

La quantità di acqua presente nell'apposita piscina necessaria per la rimozione del calore di decadimento residuo è sufficiente a refrigerare il reattore per almeno 24 h in assenza di interventi esterni.

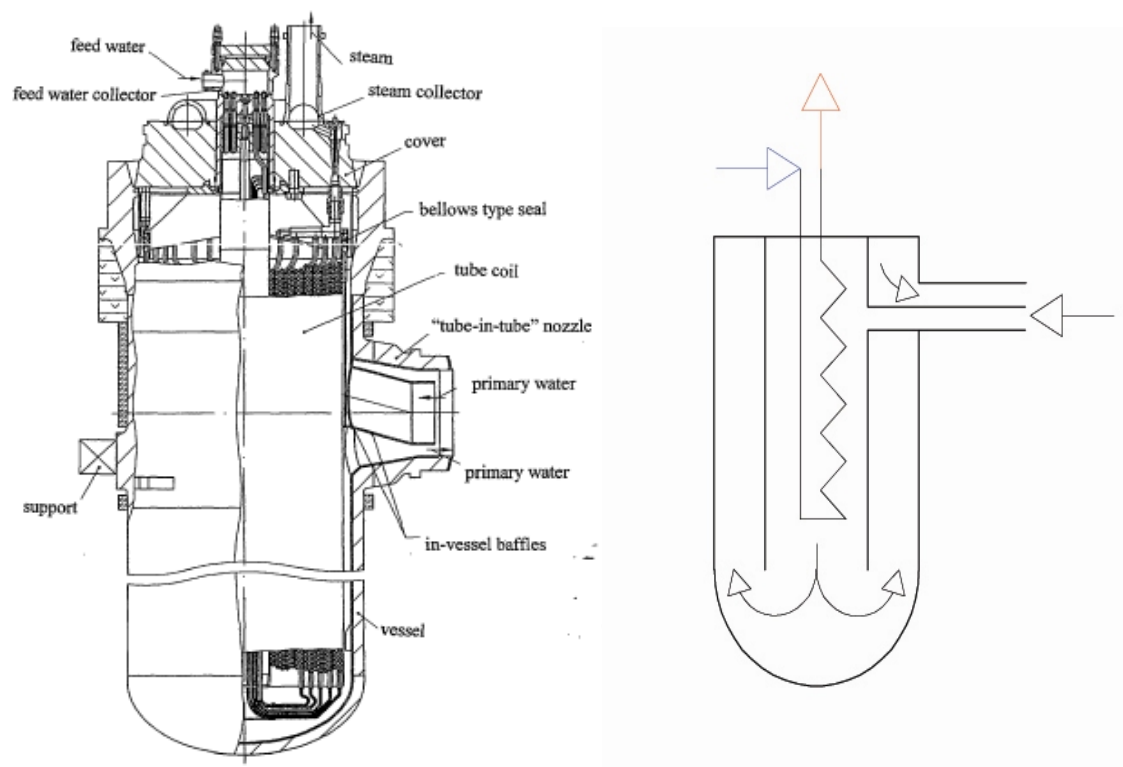


Fig. 32. SG OT esterno utilizzato nell'impianto con KLT-40C e schema di funzionamento

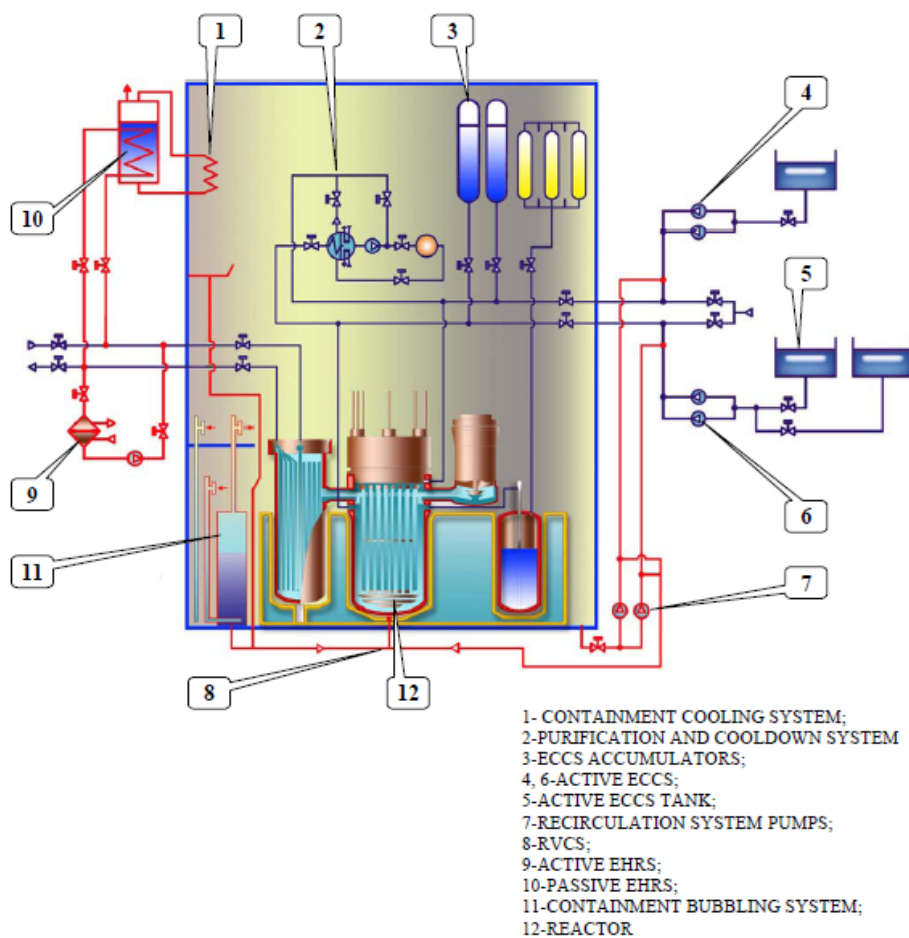


Fig. 33. Schema impianto (in rosso sistemi aggiuntivi rispetto a impianto KLT-40)

MISURE DI RISPOSTA AD UN INCIDENTE SEVERO

Sono previsti sistemi di iniezione di acqua tramite le tubazioni normalmente dedicate al sistema di purificazione grazie all'impiego di apposite pompe previste a tal fine.

Si prevedono sistemi per limitare il danneggiamento del nocciolo basati sull'iniezione di acqua, da appositi accumulatori, che consente di mantenere costantemente il nocciolo sotto battente d'acqua evitandone l'asciugamento. In questo modo si scongiura la fusione anche solo parziale, del nocciolo, ed un riallocaimento del corium fuso nella testa inferiore del vessel. Qualora dovesse aversi fusione del nocciolo, considerata come BDBA, al fine di poter avere la ritenzione del corium fuso, all'interno del RPV, è previsto un sistema per refrigerarlo finalizzato a limitare la temperatura del vessel che porterebbe ad avere un decadimento delle proprietà meccaniche. In questa condizione si verrebbero ad avere delle fessurazioni, in particolare se il primario non è stato depressurizzato, con conseguente fuoriuscita del corium.

SMART (COREA)

DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

L'impianto SMART è un reattore di tipo PWR, integrato, con potenza di 330 MWth ed attualmente in fase di sviluppo da parte dello KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) per applicazioni di cogenerazione mirate alla dissalazione dell'acqua di mare e alla produzione di circa 90 MWe (Fig. 34 e Fig. 35).

I sistemi principali che caratterizzano tale impianto sono:

- Il sistema passivo di rimozione del calore di decadimento (RHRS);
- Il sistema passivo di refrigerazione di emergenza del nocciolo (ECCS);
- Il vessel di salvaguardia;
- Il sistema passivo di protezione dalla sovrappressione del contenimento.

Tutti i sistemi di sicurezza sono garantiti per funzionare almeno 72 h senza bisogno di alcun intervento umano e alimentazione esterna.

Il reattore è stato progettato per lavorare in assenza di boro, fattore che, come già detto per gli altri impianti, comporta una semplificazione degli ausiliari; la riduzione di reattività dovuta al burn-up si compensa attraverso una movimentazione fine delle barre di controllo.

Tab. 8. Caratteristiche principali dell'impianto

Tipo di Reattore	IPWR
Potenza [MWth] ([MWe])	330 (90)
Tipologia di raffreddamento	Circolazione forzata
Portata primaria [kg/s]	152.5
Numero SG e tipologia	12 Once Through
Pressione di esercizio [bar]	150
Temperatura ingresso/uscita [°C]	270/310
Pressione secondario [bar]	30
Temperatura alimento secondario [°C]	180
Temperatura minima vapore [°C]	274
Dimensioni RPV d/h [m]	3.96/9.8

PRESSURIZZATORE (PZR)

Il pressurizzatore, connesso con il serbatoio di azoto presente all'esterno del RPV, reagisce automaticamente alle variazioni di pressione. Nel pressurizzatore non sono presenti né riscaldatori né spruzzatori ma solamente un sistema di refrigerazione che consente di ridurre la pressione parziale del vapore attenuando la variazione di pressione che si verrebbe ad avere a seguito di modifiche della potenza. Inoltre il sistema di refrigerazione del pressurizzatore, caratteristico della soluzione SMART, serve per mantenere limitate le temperature del gas e dell'acqua/vapore; con lo stesso intento è inserito un isolante termico tra il pressurizzatore e la zona sottostante al fine di ridurre la conducibilità termica tra primario e pressurizzatore.

GENERATORI DI VAPORE (SG)

L'impianto SMART possiede 12 SG identici disposti nella zona anulare tra il barrel ed il RPV. Il refrigerante primario fluisce lato mantello mentre il secondario lato tubi, con vantaggi dovuti alla configurazione "once-through" e alla presenza di sollecitazioni del fascio tubiero globalmente per compressione.

Per avere una distribuzione simmetrica della rimozione del calore dal RPV, oltre ad essere disposti secondo opportuna geometria nella zona anulare, gli SG presentano al loro interno 6 moduli indipendenti. Ciascun modulo ha le proprie piastre di testa per l'alimentazione e per l'uscita del vapore. Sei moduli, facenti parte di 3 SG adiacenti (2 per ogni SG), sono connessi ad un unico bocchello e, di seguito, tre bocchelli sono uniti in un'unica sezione. La struttura appena descritta è stata scelta per minimizzare gli effetti di un evento SGTR poiché la chiusura di una linea vapore e di alimentazione riguarderebbe, in modo solo parziale, solo 3 SG,

cui la stessa risulta connessa, creando uno squilibrio, nella geometria di deflusso, molto limitato. Nel caso di normale spegnimento del reattore, gli SG sono utilizzati come scambiatori di calore per il sistema PRHRS.

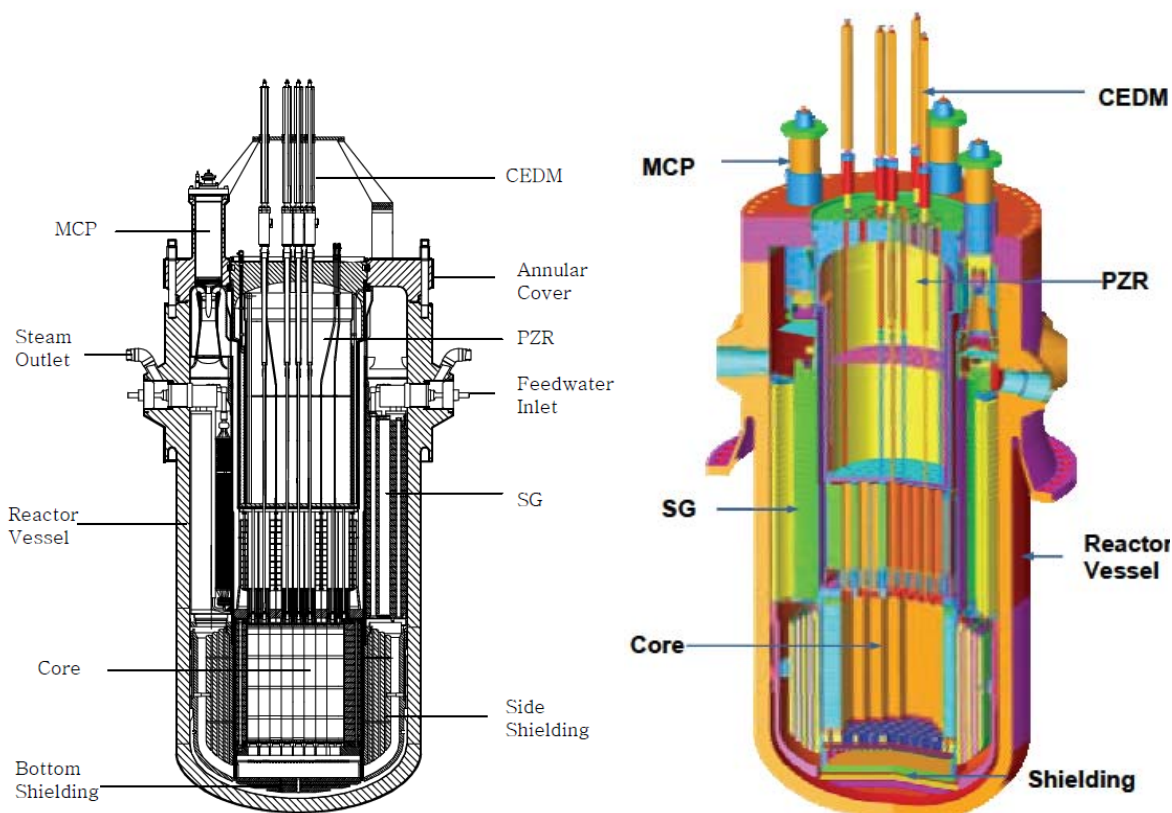


Fig. 34. Disposizione nel RPV

POMPA DI CIRCOLAZIONE DEL REFRIGERANTE PRIMARIO (MCP)

Tali pompe sono dotate di un motore immerso e non richiedono sigilli. Questa caratteristica consente di eliminare da progetto l'incidente dovuto al fallimento della tenuta delle pompa.

SISTEMI DI SPEGNIMENTO DEL REATTORE

Lo spegnimento del reattore si ottiene attraverso uno dei due sistemi previsti, il primo consiste in 32 barre di controllo (B_4C) che possono essere inserite all'interno del nocciolo per gravità. In caso di fallimento dello FSS è previsto che possa intervenire un secondo sistema, di backup (composto da due serbatoi da 6 m^3 con circa 30 g di acido borico ogni kg di acqua), attraverso il quale viene pompata acqua borata nel RPV¹⁷.

SISTEMA PASSIVO DI ASPORTAZIONE DEL CALORE DI DECADIMENTO RESIDUO (PRHRS)

Il sistema PRHRS è costituito da quattro treni indipendenti, ciascuno dei quali è caratterizzato da una capacità pari al 50%, due sono quindi sufficienti per la completa rimozione del calore di decadimento residuo prodotto all'interno del nocciolo.

Ogni treno è costituito da uno scambiatore di calore e da un serbatoio di compensazione (per fornire acqua al circuito necessaria ad occupare il volume all'interno dei generatori di vapore che durante il normale funzionamento è pieno di vapore), a due a due i treni condividono la stessa piscina di raffreddamento (cooldown tank). Questo sistema utilizza, per l'asportazione del calore di decadimento dal refrigerante

¹⁷ Per l'iniezione dell'acqua borata è necessaria una pompa e pertanto il sistema è attivo.

primario, il circuito degli SG ed il funzionamento del sistema è garantito per avere la rimozione del calore per 72 h senza necessità di interventi esterni.

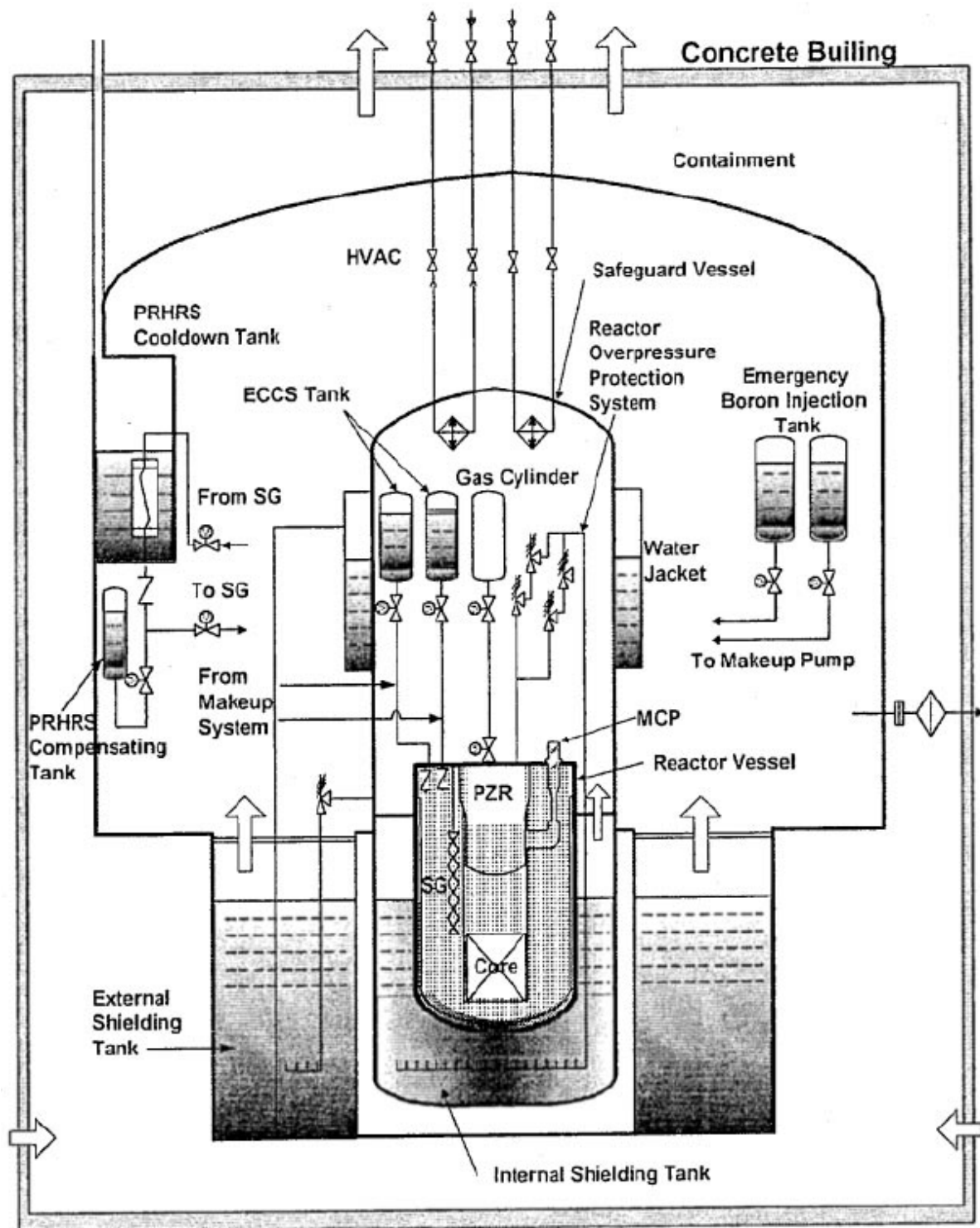


Fig. 35. Schema dei sistemi presenti

SISTEMA DI REFRIGERAZIONE DEL NOCCIOLO IN EMERGENZA (ECCS)

Grazie alla configurazione integrata si elimina da progetto la possibilità che possa presentarsi l'evento di LBLOCA poiché la penetrazione più grande che è stata prevista ha un diametro di 20 mm. È il sistema ECCS che protegge il nocciolo dall'asciugamento qualora si abbia un evento di SBLOCA.

Lo ECCS è formato da 3 treni indipendenti, ciascuno con capacità del 100%, composti da un serbatoio cilindrico da 5 m³ pressurizzato con azoto, valvole di intercettazione e di non ritorno, da un disco di rottura e dalla tubazione, da 20 mm, che lo connette al RPV.

In seguito ad un incidente, il RPV si depressurizza e, nel momento in cui la pressione dei serbatoi dei treni ECCS risulta superiore a quella interna del RPV, si ha la rottura dell'apposito disco ed il conseguente allagamento del nocciolo.

RECIPIENTE DI SALVAGUARDIA (SV)

Il recipiente di salvaguardia (SV – Safeguard Vessel) è un ulteriore contenimento, esterno al RPV, nel quale sono inclusi tutti i sistemi che costituiscono il primario e lavora alla pressione di 3.0 MPa. La funzione principale di tale sistema è di confinare qualsiasi perdita che si possa avere dal primario. Il vapore scaricato dalle valvole di sicurezza dello SV, in seguito ad un evento di BDBA, è convogliato, attraverso opportune tubazioni e spargers, nella piscina esterna, che funge anche da schermo (External Shielding Tank), dove condensa.

SISTEMA DI PROTEZIONE DEL REATTORE DA SOVRAPRESSIONI (ROPS)

Il sistema ROPS è previsto per ridurre la pressione all'interno del RPV in seguito ad un postulato evento di BDBA relativo al fallimento di un sistema di controllo.

Il sistema, composto da due treni paralleli connessi al pressurizzatore attraverso una sola tubazione, che si riuniscono nuovamente in un unico condotto per raggiungere il serbatoio di schermaggio interno (Internal Shielding Tank), scarica vapore dal pressurizzatore per farlo condensare, ottenendo la riduzione delle pressioni parziali del gas e del vapore all'interno del pressurizzatore e quindi della pressione del sistema primario. La separazione in due linee parallele è effettuata per inserire due treni di valvole in parallelo che consentano di by-passare l'altro ramo qualora una valvola fallisca; ciascuna delle linee è equipaggiata con due valvole di sicurezza e un disco di rottura.

SISTEMA DI MITIGAZIONE DELL'INCIDENTE SEVERO

Il sistema di mitigazione di un eventuale incidente severo (SAMS – Severe Accident Mitigation System) ha la funzione di contenere il corium all'interno del contenimento. Un piccolo gap di aria presente all'esterno della parte bassa del RPV viene riempito di acqua attraverso il sistema di make-up¹⁸. La refrigerazione contemporanea dall'esterno e dall'interno del RPV mirano ad ottenere un sistema di ritenzione che consenta di mantenere il corium completamente all'interno del RPV. Sono inoltre previsti bruciatori per idrogeno che consentono di mantenere bassa la concentrazione dello stesso all'interno dello SV.

¹⁸ È previsto l'utilizzo di una pompa, pertanto il sistema è attivo.

ANALISI COMPARATIVA DELLE SOLUZIONI PROPOSTE E CONSEGUENTE IDENTIFICAZIONE DEI CRITERI OPERATIVI DI PROGETTO PER UN IMPIANTO MIGLIORATIVO

Dopo aver analizzato alcuni dei principali impianti di piccola taglia proposti a livello internazionale, ed averne studiato il funzionamento, l'obiettivo ultimo che si vuole raggiungere è di comparare, tra loro, le diverse soluzioni proposte per alcuni degli aspetti più importanti riguardanti i reattori nucleari, al fine di individuare le soluzioni che risultano effettivamente più interessanti per essere applicate ad un reattore di piccola taglia. L'analisi verrà effettuata a livello funzionale piuttosto che di sistema poiché negli impianti complessi, ed in questo particolare caso negli impianti nucleari, è possibile adempiere ad analoghe funzioni attraverso sistemi differenti o tramite gli stessi sistemi, ma caratterizzati da allineamenti differenti dei vari componenti. In particolare, come già accennato in precedenza, al fine di rendere più agevole il confronto tra i diversi sistemi, si confronterà ciascuna delle soluzioni con quella proposta nell'impianto MARS.

CIRCOLAZIONE DEL REFRIGERANTE PRIMARIO

L'aspetto della circolazione del refrigerante primario è un aspetto fondamentale all'interno di un impianto nucleare per garantire che in ogni condizione d'impianto il calore prodotto dal nocciolo sia asportato dal circuito primario. La soluzione più comunemente scelta per i reattori che si sono analizzati in questo studio, prevede l'impiego di pompe per la circolazione del refrigerante primario durante il normale funzionamento, e di sfruttare la circolazione naturale per l'asportazione del calore in condizioni incidentali. Le pompe scelte per la circolazione forzata presentano caratteristiche specifiche in ognuno dei progetti analizzati; in particolare in due casi la circolazione forzata non viene utilizzata neanche durante il normale funzionamento, poiché a questa si preferisce la circolazione naturale.

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 9. Definizione delle soluzioni adottate per la circolazione del refrigerante primario

REATTORE	CIRCOLAZIONE DEL PRIMARIO	SIGLA
MARS	Forzata con 1 pompa centrifuga sull'unico loop	B1
CAREM	Naturale	A
MRX	Forzata con 2 pompe (assiali ¹⁹) ad asse orizzontale flangiate sul RPV	B2
PSRD	Naturale	A
IRIS	Forzata con 8 pompe spool nel RPV (ciascuna dedicata ad uno SG)	B3
KLT-40C	Forzata con 4 pompe esterne con connessione diretta al RPV	B1
SMART	Forzata con 4 pompe assiali monostadio incorporate nella copertura anulare	B4

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

A) Naturale

B) Forzata

- 1) Pompe con connessione al RPV tramite tubazione
- 2) Pompe flangiate sul RPV
- 3) Pompe spool nel RPV
- 4) Pompe integrate nella copertura del RPV

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + Il flusso primario è garantito per sola circolazione naturale non è possibile LOFA per l'assenza dell'alimentazione o per il grippaggio della pompa.

¹⁹ Informazione ricavata dai disegni, dati specifici non disponibili

- Circolazione naturale prevede portate minori, l'aumento di temperatura attraverso il nocciolo e le superfici richieste per gli SG (dato il valore ridotto del coefficiente di scambio termico) sono maggiori.
- ✓ È necessario l'utilizzo di una struttura integrata, una soluzione a loop non consente di prevedere circolazione primaria solo naturale.
- ✓ Deve essere necessario avere il RPV con altezza maggiore per prevedere l'inserimento degli SG e per avere un battente tale da garantire l'instaurarsi della circolazione naturale.

SOLUZIONE B1

- + Possibile prevedere all'esterno del RPV una sola pompa, nelle altre soluzioni, per ottenere una distribuzione uniforme del deflusso, è necessario distribuirne simmetricamente un certo numero (vero nel solo caso del MARS, nel KLT-40C date le caratteristiche delle connessioni delle pompe, anche se esterne al RPV devono avere una distribuzione simmetrica).
- + Soluzione utilizzata nella maggior parte dei reattori commerciali in esercizio, grande conoscenza della soluzione.
- La tubazione che dal RPV porta il refrigerante primario alla pompa e viceversa rende possibile il LBLOCA.

SOLUZIONE B2

- Non sono pompe utilizzate frequentemente perché presentano problematiche dovute alla disposizione orizzontale. Si hanno problemi legati al carico non uniforme sul rotore e alla possibilità di deformazione dell'albero in seguito a soste di lunga durata ad elevata temperatura (soluzione prevista dai giapponesi e problemi risolti con l'utilizzo di opportuni cuscinetti ed alleggerimento della pompa).
- Necessario prevedere delle penetrazioni nella parete del RPV per flangiare la pompa.
- ✓ Il confine in pressione si sposta all'esterno del motore della pompa.

SOLUZIONE B3

- + Sono necessarie le sole penetrazioni legate all'alimentazione elettrica e ai circuiti di refrigerazione delle pompe stesse (in studio soluzioni per eliminare la refrigerazione).
- ✓ Tipologia proposta da Westinghouse "Integral Motor Propelled" e sviluppata successivamente.
- ✓ Pompe di questa tipologia derivano dall'industria chimica e da applicazioni marine in cui sono necessari elevati flussi e si hanno a disposizione spazi ridotti.
- ✓ Nella soluzione prevista per il reattore IRIS, ogni singola pompa è associata ad un corrispondente SG.
- ✓ Le pompe spool sono caratterizzate da elevata inerzia.

SOLUZIONE B4

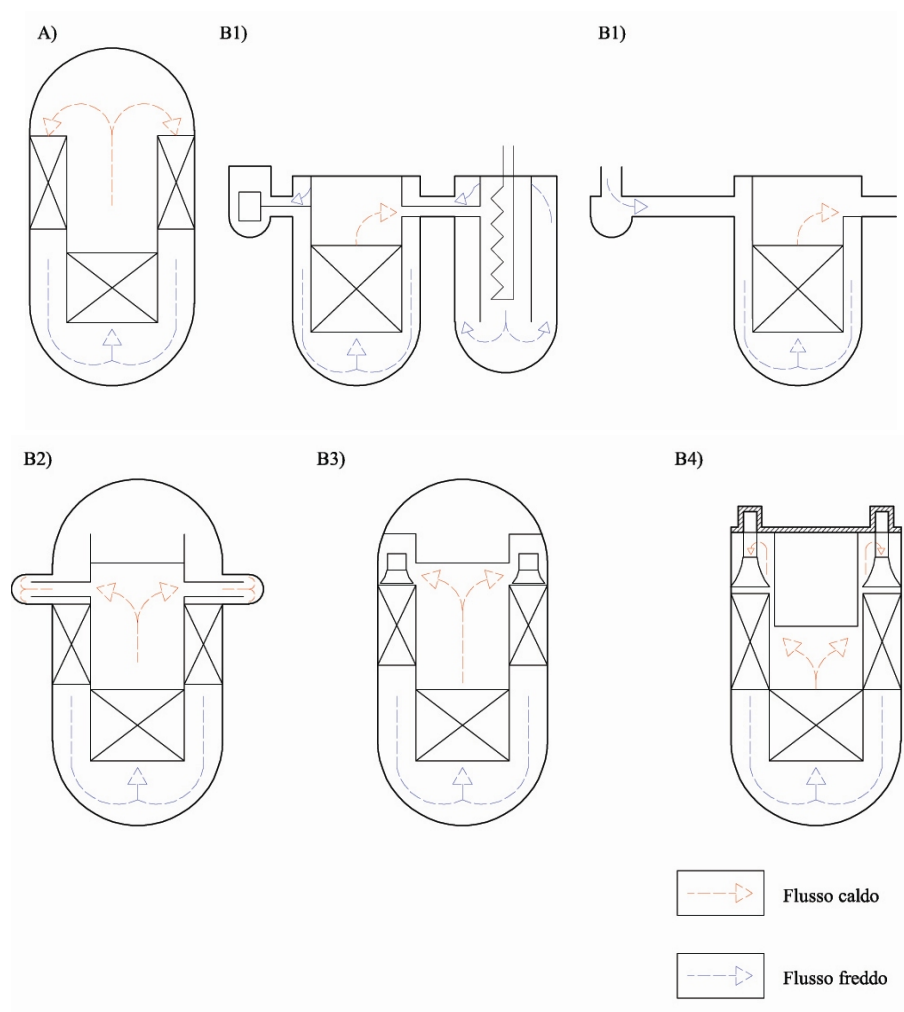
- + Non sono previste le tenute per le pompe perché queste sono integrate nella copertura anulare del RPV, si esclude l'incidente dovuto al fallimento della tenuta della pompa.
- ✓ Ogni pompa è dotata di un suo proprio motore asincrono con il quale ha in comune l'albero motore.

CLASSIFICAZIONE

Tab. 10. Classificazione delle soluzioni adottate per la circolazione del refrigerante primario

CIRCOLAZIONE DEL PRIMARIO							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	alto	medio	basso	alto	basso	medio	medio
facilità di manutenzione	alto	basso	basso	alto	basso	basso	basso
esperienza sulla tecnologia	alto	medio	basso	alto	basso	alto	medio
riduzione delle penetrazioni	alto	medio	basso	alto	basso	basso	basso
sigla	A	B3	B2	A	B4	B1	B1
Classificazione	1°	2°	3°	1°	3°	1°	2°

SCHEMI SOLUZIONI



TRASFERIMENTO DI POTENZA AL SECONDARIO

Il trasferimento di potenza al circuito secondario è un aspetto fondamentale ai fini della produzione del vapore da inviare in turbina. Negli impianti di piccola e media taglia che si sono analizzati, la soluzione che viene sempre scelta è quella di utilizzare SG di tipologia once-through. L'unica eccezione per quanto riguarda l'impiego di generatori di vapore di questa tipologia è dato dall'impianto MARS che prevede un generatore di vapore di tipologia a ricircolo installato sul loop di circolazione primario. La differenza di scelta progettuale è proprio dovuta alla differente struttura che si prevede di utilizzare per l'impianto MARS. A differenza degli impianti studiati, in cui si è scelto di utilizzare una struttura integrata per i vantaggi che si riescono ad ottenere (es. eliminazione eventi LBLOCA), l'impianto MARS, dotato di un contenimento esterno in pressione che evita la possibilità di avere eventi di LOCA, presenta una struttura di tipo tradizionale alla quale si adattano meglio i generatori di vapore a ricircolazione.

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 11. Definizione delle soluzioni adottate per il trasferimento di calore dal primario al secondario

REATTORE	TRASFERIMENTO POTENZA AL SECONDARIO	SIGLA
MARS	SG verticale a ricircolo con primario lato tubi e secondario lato mantello	B2
CAREM	SG OT elicoidale INV con 1 penetrazione	A1
MRX	SG OT elicoidale INV con 1 penetrazione	A1
PSRD	SG OT elicoidale INV con 1 penetrazione	A1
IRIS	SG OT elicoidale INV con 2 penetrazioni	A2
KLT-40C	SG OT elicoidale OUTV con primario lato mantello e secondario lato tubi	B1
SMART	SG OT elicoidale INV con 1 penetrazione	A1

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA:

- A) SG – INV
 - 1) una penetrazione nel RPV
 - 2) due penetrazioni nel RPV
- B) SG – OUTV
 - 1) OT elicoidale
 - 2) a ricircolo

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONI A1 E A2

- + La presenza del primario lato mantello e del secondario lato tubi consente di avere il fascio tubiero sottoposto globalmente a sollecitazioni di compressione. La probabilità di rottura diminuisce e la possibilità di avere propagazione della rottura (collassamento), ad altre tubazioni vicine, diventa virtualmente impossibile.
- + SG OT consente di autolimitare la potenza asportata dal secondario in caso di rottura della linea vapore.
- + A1 – Soluzione con 1 penetrazione riduce il numero di penetrazioni nel RPV.
- + A2 – Soluzione con 2 penetrazioni garantisce maggiore facilità di lavorazione per l'assemblaggio dello scambiatore. Su sviluppo della soluzione proposta da Ansaldo per ISIS, viene prevista, nel reattore IRIS, una soluzione per l'ispezione degli SG ad impianto fermo senza la rimozione degli stessi (tecniche ad ultrasuoni di ispezione visuale).
- Possibilità di avere a seguito di SGTR e contemporaneo fallimento delle valvole di intercettazione del secondario, linea vapore o alimentazione, lo svuotamento del primario.
- ✓ L'impiego di SG-OT fa sì che si abbia una ridotta quantità di acqua lato secondario. Senza opportuni provvedimenti la qualità del vapore è variabile a secondo delle condizioni di funzionamento. Si ha la necessità di asservire il sistema di alimentazione del secondario alla potenza dell'impianto per avere in uscita vapore con titolo termodinamico costante.

- ✓ Le valvole di intercettazione (MSIV e FIV) sono rilevanti ai fini della sicurezza perché necessarie ad evitare lo svuotamento del primario a seguito di SGTR.

SOLUZIONE B1

- + Soluzione con secondario lato tubi e primario lato mantello consente di sottoporre il fascio tubiero a sollecitazioni di compressione riducendo guasti e probabilità di propagazione.
- + La tipologia di connessione consente di ridurre la probabilità di LBLOCA poiché la lunghezza delle tubazioni primarie è minimizzata.

SOLUZIONE B2

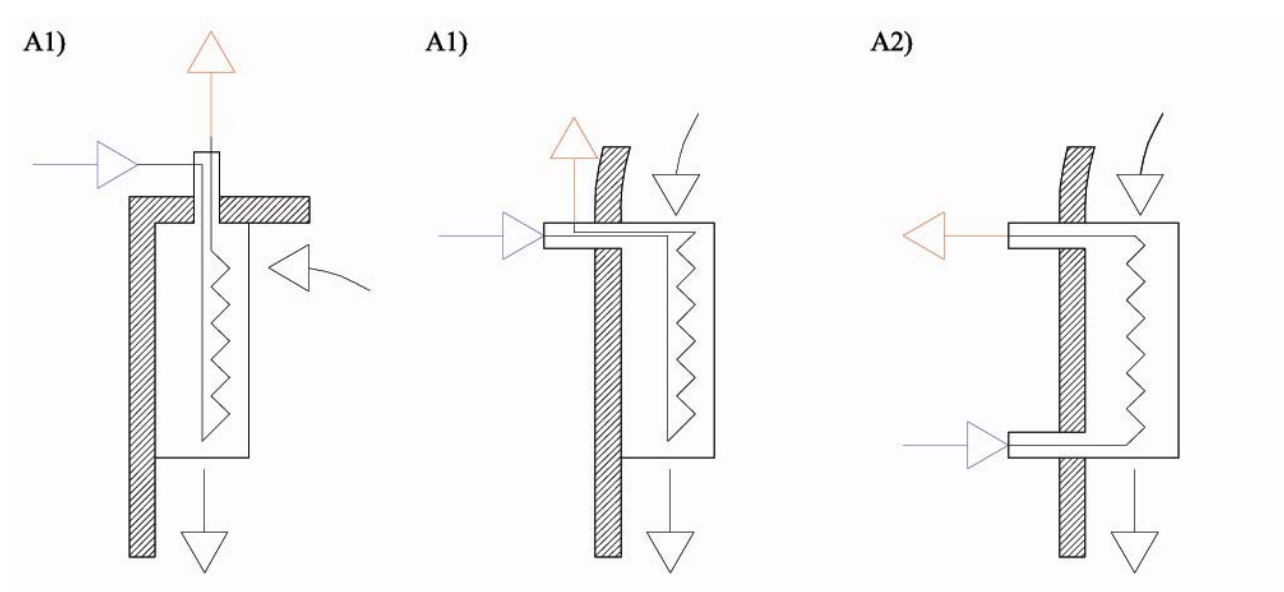
- + Soluzione tradizionale, generalmente applicata nei PWR a loop commerciali, sulla quale si ha molta esperienza.
- + La grande quantità di acqua presente al secondario consente di assorbire eventi di heat-up e di mantenere costanti le caratteristiche del vapore.

CLASSIFICAZIONE

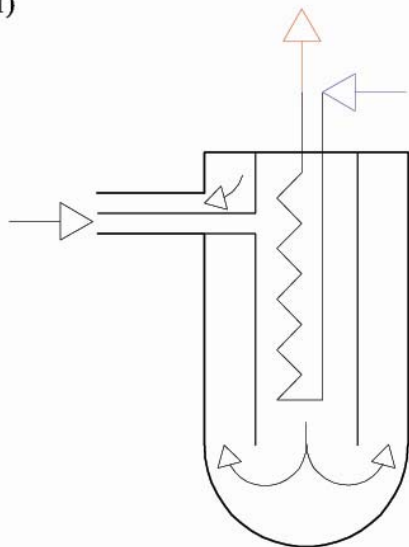
Tab. 12. Classificazione delle soluzioni adottate per i generatori di vapore

TRASFERIMENTO DI POTENZA AL SECONDARIO							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	basso	medio	basso	basso	basso	alto	basso
facilità di ispezione	medio	medio-alto	medio	medio	medio	medio	medio
esperienza sulla tecnologia	medio	medio	medio	medio	medio	alto	medio
limitazione incidente SGTR	alto	alto	alto	alto	alto	medio	alto
sigla	A1	A2	A1	A1	A1	B2	B1
Classificazione	2°	1°	2°	2°	2°	1°	2°

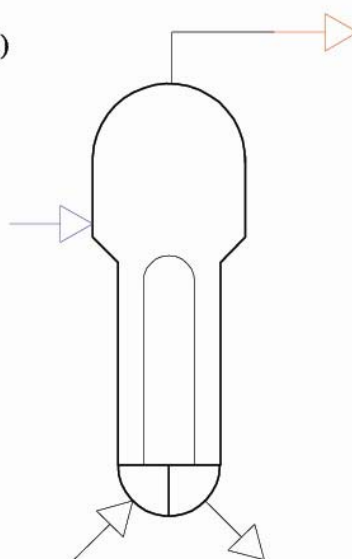
SCHEMI SOLUZIONI



B1)



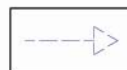
B2)



Flusso primario



Flusso caldo secondario



Flusso freddo secondario

PRESSURIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 13. Definizione delle soluzioni adottate per la pressurizzazione del sistema primario

REATTORE	PRESSURIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO	SIGLA
MARS	A bolla di vapore OUTV	B1
CAREM	Autopressurizzazione	A
MRX	A bolla di vapore INV	C1
PSRD	Autopressurizzazione	A
IRIS	A bolla di vapore senza spruzzatori INV	C2
KLT-40C	A gas OUTV	B2
SMART	A gas e acqua (vapore + liquido) INV	C3

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA:

- A) Autopressurizzazione
- B) Pressurizzatore OUTV
 - 1) a bolla di vapore
 - 2) a gas
- C) Pressurizzatore INV
 - 1) A bolla di vapore attorno CRDM
 - 2) A bolla di vapore in testa al RPV senza spruzzatori
 - 3) A gas ed acqua (vapore + liquido)

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + L'assenza dei componenti tradizionali (spruzzatori e riscaldatori) fornisce vantaggi in termini di costi e di sicurezza poiché si riduce il numero dei componenti d'impianto che possono fallire.
- Imporre la pressione del sistema alla pressione di saturazione, corrispondente alla temperatura del volume d'acqua all'uscita dal nocciolo, garantisce solo ridotti margini rispetto alle condizioni critiche di riferimento (DNBR minore).
- ✓ L'autopressurizzazione è generalmente legata all'utilizzo della circolazione naturale, perché l'impiego di pompe nella parte alta del RPV non sarebbe garantito rispetto all'instaurarsi delle condizioni di cavitazione (si lavora, specialmente nella parte più alta, in leggerissimo sottoraffreddamento).

SOLUZIONE B1

- + Pressurizzatore più diffuso nei PWR commerciali, molta esperienza.
- ✓ Necessità di prevedere una penetrazione nel RPV o nella gamba calda di un loop.

SOLUZIONE B2

- Possibilità di assorbimento del gas in acqua calda e rilascio, con conseguente accumulo, in zone caratterizzate da temperature minori del refrigerante.
- ✓ Necessità di prevedere ulteriori componenti nel contenimento, per il funzionamento del pressurizzatore a gas è necessario serbatoio con gas, nel contempo elimino spruzzatori e riscaldatori.

SOLUZIONE C1

- + Tipologia a bolla di vapore integrata nel RPV, sfrutta la zona anulare attorno al CRDM.
- Necessarie penetrazioni nel RPV per spruzzatori e riscaldatori.

SOLUZIONE C2

- + L'enorme volume occupato dal vapore consente di rispondere agilmente a transitori ($V_{\text{vapore}}/P_{\text{th}} \cong 5$ volte maggiore degli altri pressurizzatori).

- + L'applicazione del pressurizzatore INV alla testa del RPV consente di avere una zona di separazione tra l'acqua del pressurizzatore e quella del primario consentendo riduzione degli stress termici per la testa del RPV che altrimenti si troverebbe a contatto con l'acqua del primario e del pressurizzatore.
- + Il pressurizzatore in testa ha funzione strutturale per l'ancoraggio del CRDM-INV eliminando completamente le penetrazioni alla testa.
- + Dato il grande volume di vapore vengono eliminati gli spruzzatori, agli eventi di heat-up il pressurizzatore risponde grazie alla grande quantità di vapore.
- Nella soluzione proposta per l'impianto IRIS il volume del pressurizzatore risulta molto maggiore rispetto alle soluzioni tradizionali, ed essendo INV si ripercuote sulle dimensioni del RPV.

SOLUZIONE C3

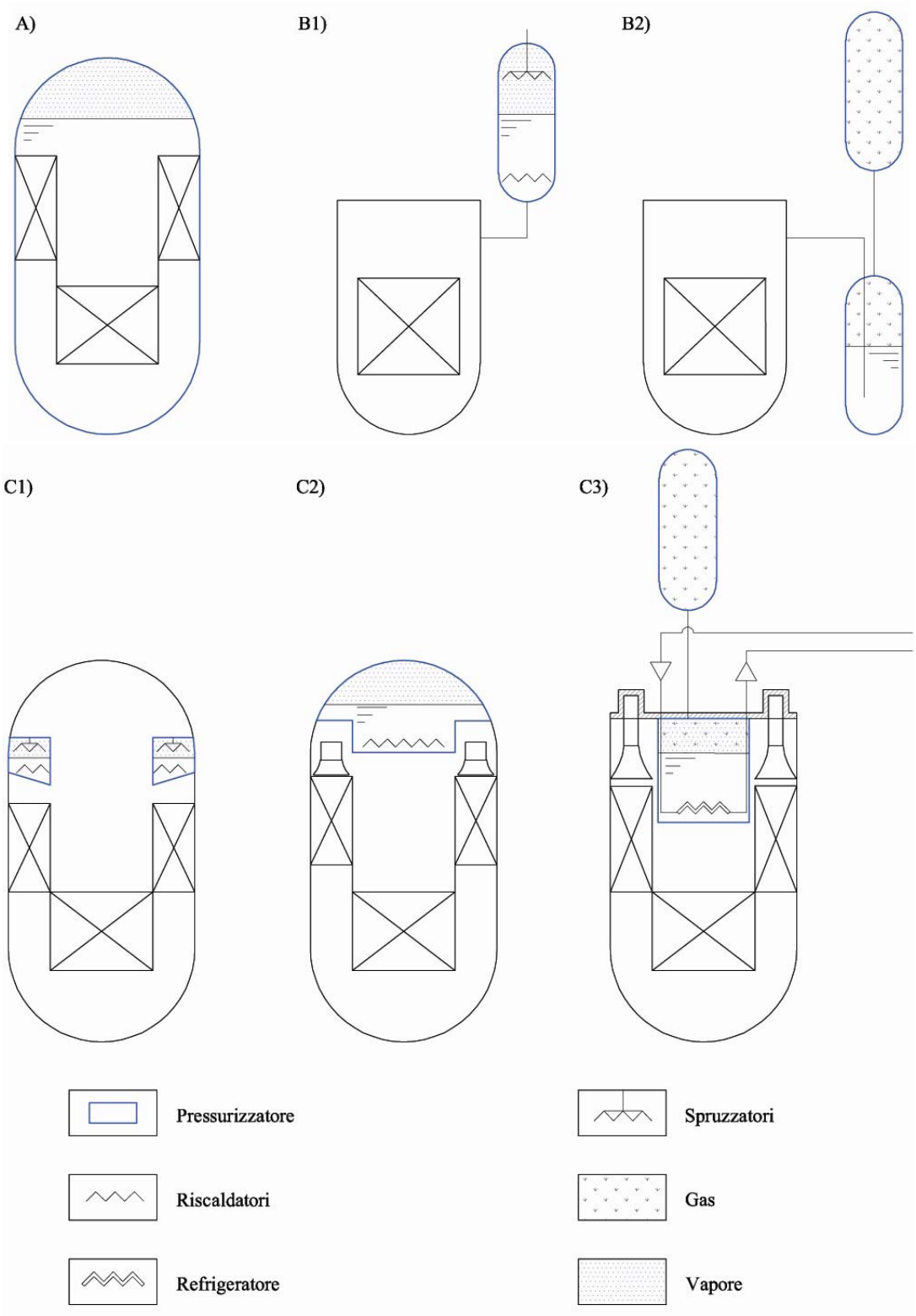
- + Il grande volume del pressurizzatore consente di rispondere bene a transitori di pressione limitandone l'aumento.
- Una soluzione di questo tipo può presentare problemi legati alla possibilità di avere assorbimenti di N₂ nell'acqua a temperatura maggiore e accumuli di gas in zone caratterizzate da temperatura minore del refrigerante. Soluzione non indicata per pressurizzatori INV.
- Necessità di penetrazioni per il gas (serbatoio) e per il sistema di refrigerazione.
- Non sono presenti spruzzatori e riscaldatori ma è presente un sistema di refrigerazione per mantenere la temperatura dell'acqua nel pressurizzatore costante e per indurre condensazione del vapore in risposta a transitori di aumento di pressione.

CLASSIFICAZIONE

Tab. 14. Classificazione delle soluzioni adottate per la pressurizzazione del primario

PRESSURIZZAZIONE DEL PRIMARIO							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	alto	medio	medio	alto	medio-basso	medio	medio
facilità di manutenzione	alto	medio	medio	alto	alto	alto	alto
esperienza sulla tecnologia	alto	medio	medio	alto	basso	alto	medio
Margine rispetto alla crisi termica	basso	alto	alto	basso	alto	alto	alto
sigla	A	C2	C1	A	C3	B1	B2
Classificazione	1°	2°	2°	1°	3°	1°	2°

SCHEMI SOLUZIONI



REFRIGERAZIONE DEL NOCCIOLO IN EMERGENZA

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 15. Definizione delle soluzioni adottate per la refrigerazione del nocciolo in emergenza

REATTORE	REFRIGERAZIONE DEL NOCCIOLO IN EMERGENZA	SIGLA
MARS	Arresto pompa, apertura valvola a tre vie e avvio passivo SCCS con capacità di asportazione del calore per un tempo illimitato senza necessità di interventi. Due treni completamente indipendenti con capacità del 100% Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..	A
CAREM	Viene prelevato vapore dalla testa del RPV e per circolazione naturale viene inviato ad uno scambiatore posto nella piscina di raffreddamento, il refrigerante primario, dopo aver condensato viene riportato nel RPV. L'avviamento si ha a seguito dell'apertura di una valvola sulla linea del condensato, due treni indipendenti ma con piscina in comune. L'asportazione del calore in assenza di interventi è garantita per almeno 48 h.	B
MRX	Per circolazione naturale attraverso il sistema EDRS (tre treni indipendenti rilasciano calore nel contenimento comune) viene asportato il calore dal primario e rilasciato nel contenimento in pressione da cui, attraverso il sistema ECWCS, viene rilasciato in atmosfera. L'avviamento si ha a seguito dell'apertura di una valvola sulla linea del condensato, generalmente chiusa, con l'alimentazione fornita da una batteria. Tempo di asportazione del calore illimitato.	C
PSRD	Avviamento in seguito all'apertura di una valvola a tre vie assoggettata alla pompa di alimentazione del secondario. Utilizzando penetrazioni degli SG, in circolazione naturale si ha asportazione di calore dal RPV e rilascio nell'acqua del contenimento (EDRS). Dal contenimento calore rilasciato all'acqua esterna ²⁰ per convezione naturale-conduzione attraverso il contenimento pieno d'acqua (nella soluzione con installazione in pozzo). Asportazione di calore per tempo illimitato.	D
IRIS	Quattro treni indipendenti, utilizzando le linee degli SG, dopo l'apertura della valvola sulla linea del condensato rilasciano il calore asportato dal RPV nella piscina di raffreddamento (piscina comune).	E
KLT-40C	L'impianto prevede sistemi attivi ECCS ad alta e bassa pressione e un sistema che utilizzando la linea degli SG, in circolazione naturale, asporta calore dal RPV e lo rilascia nella piscina di asportazione del calore. L'avviamento del sistema si ha all'apertura di una valvola e garantisce l'asportazione del calore per almeno 24 h.	F
SMART	Sistema composto da quattro treni al 50% che utilizzando gli SG asportano calore dal RPV rilasciandolo nella piscina di raffreddamento e da questa all'atmosfera.	G

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + Sistema completamente passivo
- + Due sistemi con capacità del 100% completamente indipendenti
- + Tempo illimitato di asportazione del calore di decadimento residuo senza necessità di interventi esterni

SOLUZIONE B

- Sistema avviato all'apertura di una valvola
- Linee indipendenti rilasciano calore nella stessa piscina

²⁰ Per questo impianto è prevista la possibilità che venga installato, in zone marine, all'interno di appositi pozzi dalla profondità di 50 – 100 m e che abbia il CV sommerso nell'acqua di mare. La soluzione alternativa, analoga a quella prevista con il reattore MRX, è di avere l'atmosfera esterna costituita da aria. Di seguito non si farà riferimento a questa soluzione perché è utilizzabile l'analisi effettuata per il reattore MRX.

- L'asportazione del calore si ha attraverso la condensazione del vapore prelevato dalla testa del RPV, in condizioni di RPV aperto tale sistema viene meno.
- ✓ Il tempo di asportazione del calore residuo di decadimento è dipendente dalla quantità di acqua presente inizialmente nella piscina di raffreddamento (garantito per 48 h). Il vapore prodotto nella piscina di raffreddamento viene fatto condensare nella piscina di soppressione del vapore.

SOLUZIONE C

- L'avviamento del sistema si ha a seguito dell'apertura di una valvola sulla linea del condensato del sistema EDRS.
- Quattro treni indipendenti per avere scambio termico dal RPV al contenimento, è presente un modo comune di guasto in seguito alla rottura del contenimento.

SOLUZIONE D

- + Avviamento attraverso l'apertura di una valvola a tre vie asservita alla pompa di alimentazione del secondario, è un sistema passivo.
- + Il circuito di asportazione del calore utilizza le penetrazioni degli SG riducendole ed evitando che in caso di guasto si possa avere overcooling del primario per intervento dell'ECCS contemporaneamente agli SG.
- + L'istallazione sotto battente d'acqua elimina il modo comune di guasto (presente nella soluzione C)
- + Asportazione di calore garantita per un tempo illimitato
- La soluzione che prevede l'istallazione del reattore all'interno di un pozzo in cui, attraverso opportune canalizzazioni, è tenuta acqua di mare, prevede costi aggiuntivi per prevedere tale sistemazione.
- ✓ Soluzione in cui è prevista l'istallazione in aria presenta 4 loop in circolazione naturale per rilasciare il calore di decadimento all'ambiente esterno (presenta un loop in più rispetto alla soluzione C ma comunque è soggetto a modo comune di guasto per rottura del CV).

SOLUZIONE E

- + Il circuito di asportazione del calore utilizza circuito degli SG riducendo le penetrazioni ed evitando che, in caso di guasto, si possa avere overcooling del primario per intervento dell'ECCS contemporaneamente agli SG.
- Quattro treni indipendenti, ciascuno al 100%, ma con scambiatori all'interno della stessa piscina (modo comune di guasto)
- Per avere l'avviamento del sistema è necessaria la chiusura delle valvole di intercettazione della linea vapore e di quella di alimentazione e l'apertura delle valvole sulla linea del condensato.
- ✓ Nella soluzione in cui si prevede l'utilizzo del circuito degli SG per l'asportazione del calore dal RPV, devono essere previsti dei serbatoi di compensazione per il riempimento del circuito in seguito alla diminuzione di temperatura e pressione rispetto alle condizioni di normale funzionamento.

SOLUZIONE F

- + Il circuito di asportazione del calore utilizza circuito degli SG riducendo le penetrazioni ed evitando che in caso di guasto si possa avere overcooling del primario per intervento dell'ECCS contemporaneamente agli SG.
- Due treni attivi: ERHR che funziona attraverso i circuiti degli SG e un circuito con scambiatore primario – terziario che consente la rimozione illimitata del calore (necessità di pompe).
- Due treni passivi per la rimozione del calore senza intervento degli operatori per un tempo minimo di 24 h. L'avviamento si ha in seguito all'apertura di una valvola e alla chiusura delle linee vapore e alimentazione.
- ✓ Sistemi sono attivati su segnalazione di appositi sistemi di controllo (attivi) o azione diretta dei parametri di processo (passivi).

SOLUZIONE G

- + Il circuito di asportazione del calore utilizza circuito degli SG riducendo le penetrazioni ed evitando che in caso di guasto si possa avere overcooling del primario per intervento dell'ECCS contemporaneamente agli SG.
- Asportazione del calore di decadimento residuo garantita per almeno 72 h senza interventi da parte degli operatori, l'avviamento del sistema non è passivo.

- ✓ Quattro treni indipendenti con capacità del 50% ciascuno.
- ✓ ECT (Emergency Cooldown Tank) disposto nella parte alta per garantire l'instaurarsi della circolazione naturale.
- ✓ CT (Compensating Tank) deve essere previsto per riempire vuoti che si vengono eventualmente a creare nel circuito SG e PRHRS nella fase iniziale e per i vuoti che si creano per l'abbassamento della temperatura nel circuito. Sistema pressurizzato a 50 bar con gas).

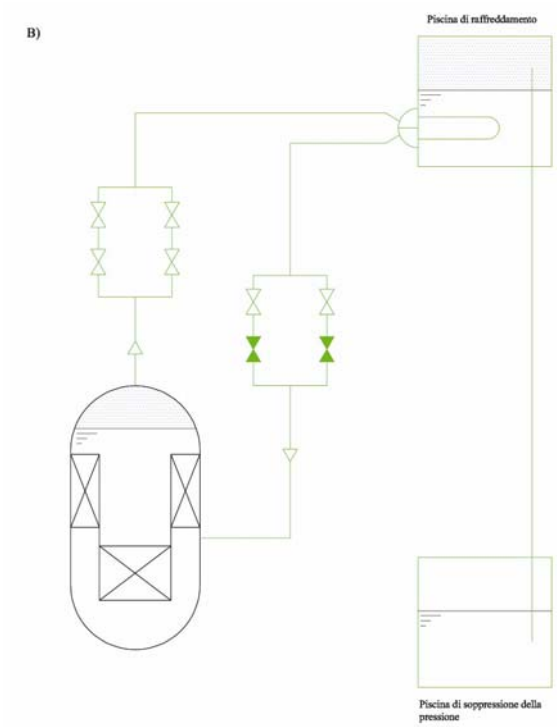
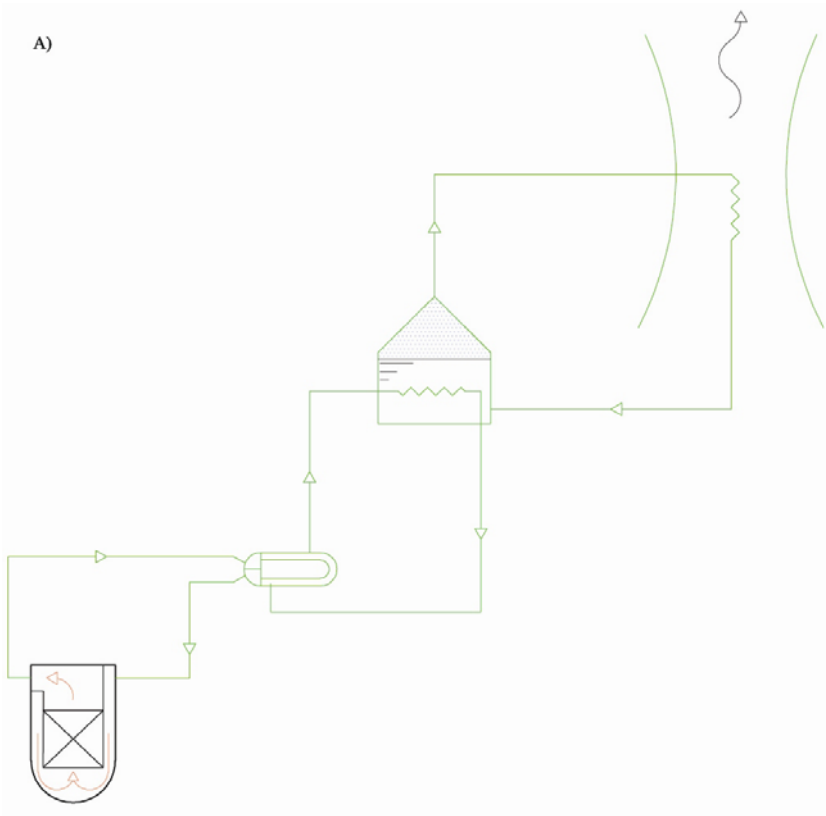
CLASSIFICAZIONE

Tab. 16. Classificazione delle soluzioni adottate per la refrigerazione del nocciolo in emergenza

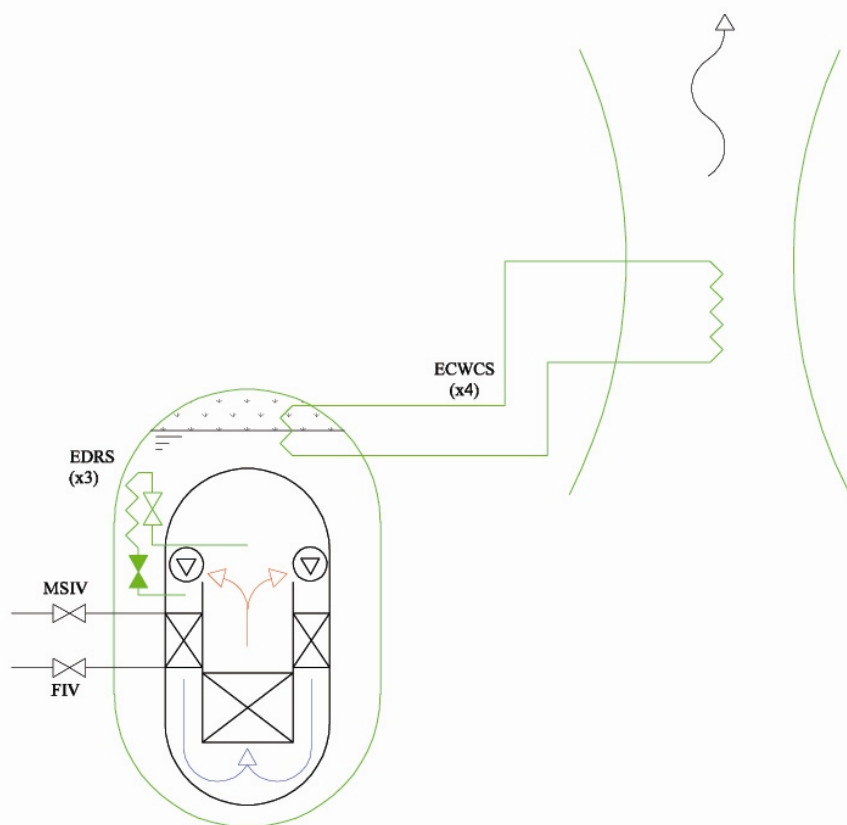
REFRIGERAZIONE NOCCIOLO IN EMERGENZA							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	medio	alto	medio	medio-basso	alto	medio	alto
livello di passività del sistema ²¹	medio (D)	medio (D)	medio	alto	medio	alto (C)	medio (D)
ridondanza e separazione fisica	medio	medio	medio	alto	medio	alto	medio
tempo di indipendenza	medio	medio	alto	alto	medio	alto	medio
sigla	B	E	C	D	G	A	F
Classificazione	4°	2°	2°	1°	3°	1°	2°

²¹ Tra parentesi, se disponibile, è riportata la categoria del sistema passivo secondo la classificazione IAEA dove "C" è un sistema passivo a tutti gli effetti, i sistemi di tipo "D" sono ad un livello intermedio tra sistemi attivi e passivi e pertanto sono definiti **"passive execution / active initiation"**.

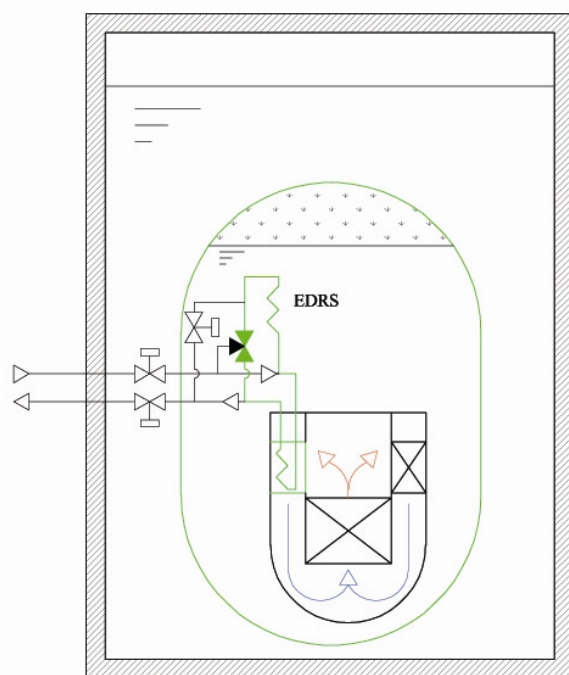
SCHEMI SOLUZIONI



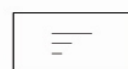
C)



D)

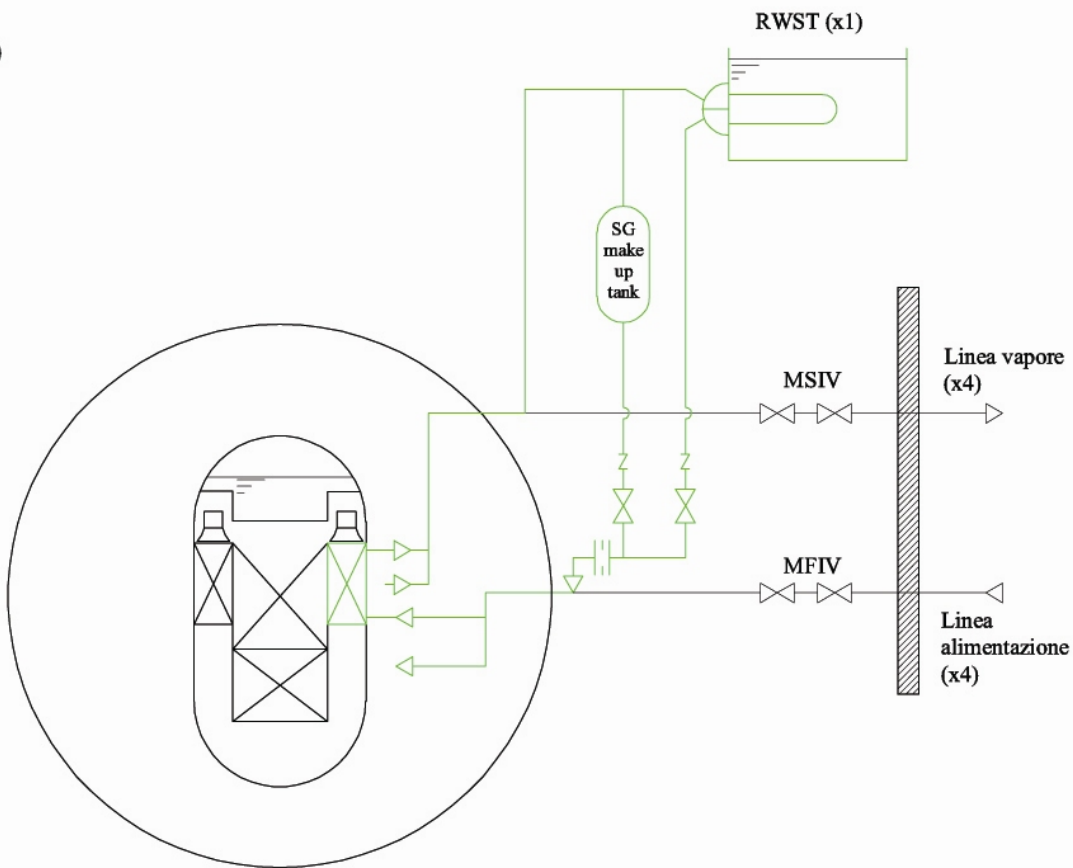


Gas

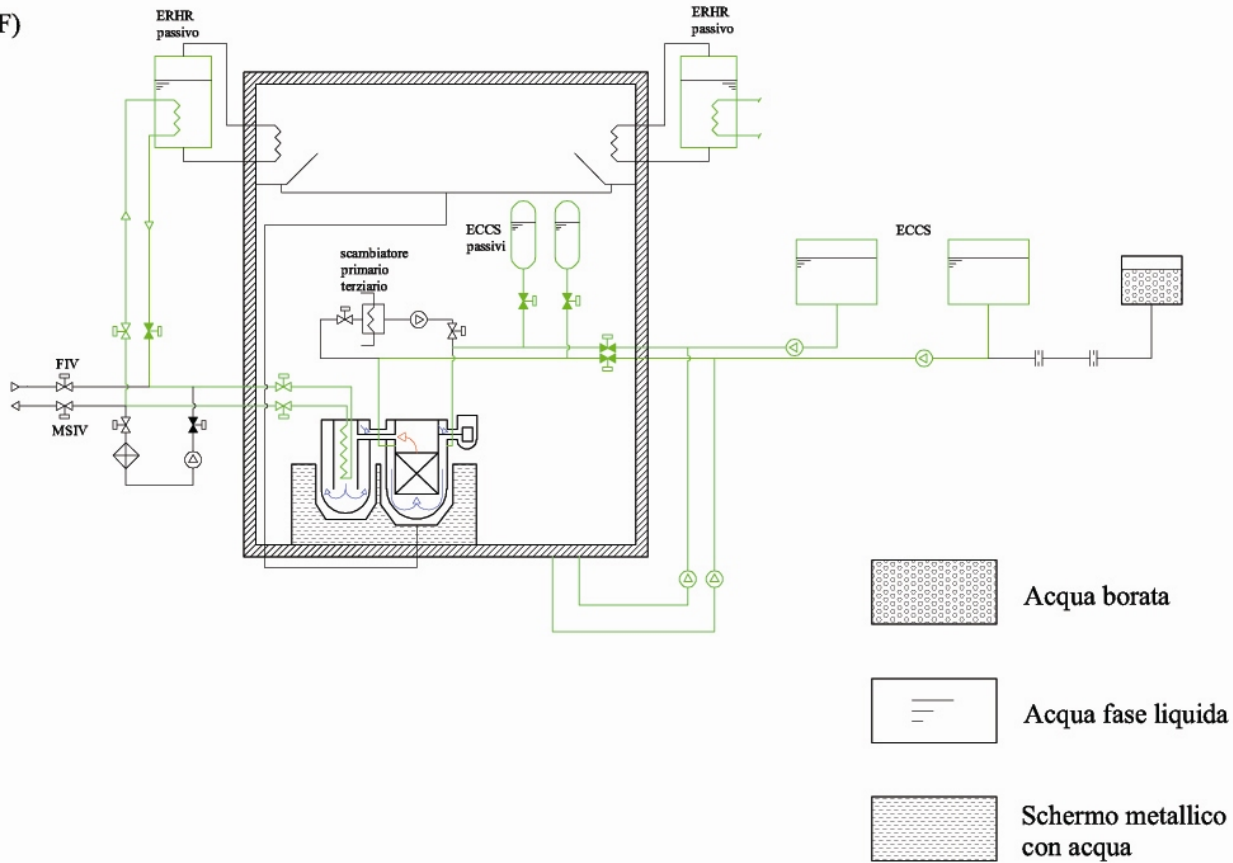


Acqua fase liquida

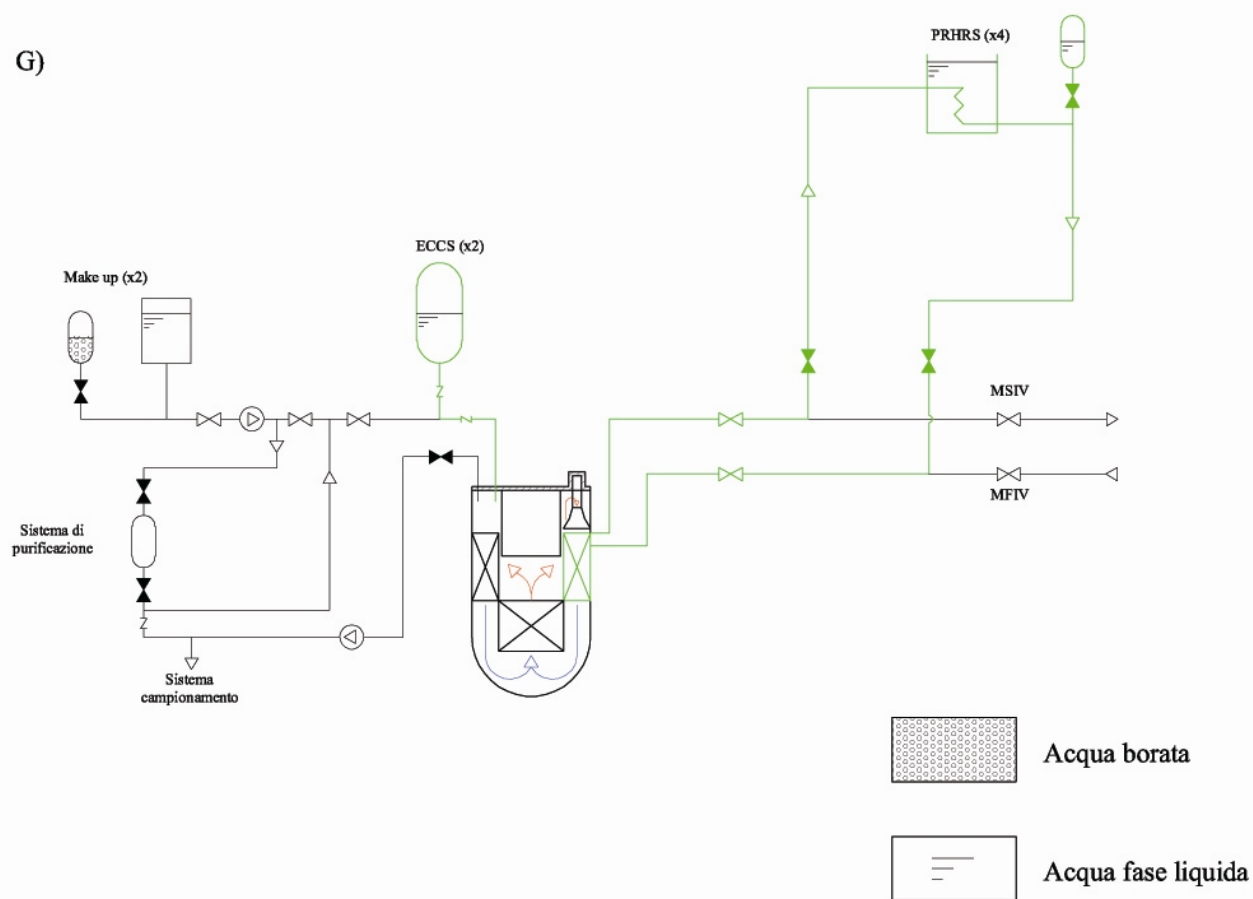
E)



F)



G)



CONTROLLO DELLA REATTIVITÀ

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 17. Definizione delle soluzioni adottate per il controllo della reattività

REATTORE	CONTROLLO DELLA REATTIVITÀ	SIGLA
MARS	CRDM – OUTV e boro	B2
CAREM	CRDM – INV	A1
MRX	CRDM – INV	A1
PSRD	CRDM – INV	A1
IRIS	CRDM – INV e boro	A2
KLT-40C	CRDM – OUTV	B1
ABV	CRDM – OUTV	B1
SMART	CRDM – OUTV	B1

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA:

A) CRDM – INV

- 1) senza boro
- 2) con boro

B) CRDM – OUTV

- 1) senza boro
- 2) con boro

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A1

- + È eliminato di progetto l'incidente di RIA dovuto all'espulsione di una barra di controllo.
- + Eliminando il boro non è necessario prevedere il funzionamento dell'apposito circuito durante il normale esercizio (diminuiscono le tubazioni che possono dare luogo ad eventi di LOCA).
- + Sono eliminati di progetto, data l'assenza del boro, incidenti di RIA dovuti alla diluizione dello stesso.
- Il CRDM si trova a lavorare in condizioni più gravose.

SOLUZIONE A2

- + Vantaggi analoghi alla soluzione A1 per quanto riguarda l'eliminazione di progetto dell'incidente di RIA di espulsione di una barra di controllo.
- Rimane possibile l'incidente RIA dovuto alla diluizione del boro

SOLUZIONE B1

- + Eliminato di progetto incidente di RIA dovuto alla diluizione del boro.
- + Riduzione della probabilità di LOCA per l'assenza in normale esercizio del sistema di regolazione del boro.
- È possibile l'incidente di RIA dovuto all'espulsione incontrollata di una barra di controllo.

SOLUZIONE B2

- Non si evita l'incidente di RIA dovuto all'espulsione di una barra di controllo.
- Si può avere LOCA sul circuito di trattamento del boro in assenza di altri accorgimenti
- Si può avere incidente RIA di diluizione del boro.

CLASSIFICAZIONE

Tab. 18. Classificazione delle soluzioni adottate per il controllo della reattività

CONTROLLO DELLA REATTIVITA'							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	alto	medio	medio-alto	medio-alto	basso	basso	medio
Presenza boro nel normale esercizio	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
tipologia veleni bruciabili	Gd ₂ O ₃	Er ₂ O ₃ ZrB ₂	Gd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Gd naturale
sigla	A1	A2	A1	A1	B1	B2	B1
Classificazione	1°	4°	2°	2°	3°	2°	1°

SPEGNIMENTO RAPIDO (FSS)

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 19. Definizione delle soluzioni adottate per lo spegnimento rapido del reattore

REATTORE	SPEGNIMENTO RAPIDO	SIGLA
MARS	barre di controllo inserite per gravità con CRDM elettromagnetico	A
CAREM	barre di controllo inserite per gravità con CRDM idraulico	C
MRX	barre di controllo inserite per gravità (+ forzate) con CRDM elettromagnetico	B
PSRD	barre di controllo inserite per gravità (+ forzate) con CRDM elettromagnetico	B
IRIS	barre di controllo inserite per gravità con CRDM idraulico	C
KLT-40C	barre di controllo inserite per gravità con CRDM elettromagnetico	A
SMART	barre di controllo inserite per gravità con CRDM elettromagnetico	A
NHR-5	barre di controllo inserite per gravità con CRDM idraulico	C

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

- A) CRDM elettromagnetico all'esterno del RPV²²
- B) CRDM elettromagnetico all'interno del RPV
- C) CRDM idraulico

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + È il sistema tradizionalmente utilizzato nei PWR commerciali, ben conosciuto ed affidabile
- Sono necessarie penetrazioni di testa, in assenza di ulteriori provvedimenti è possibile, in seguito alla rottura di una tenuta, l'espulsione di una barra di controllo.

SOLUZIONE B

- Poco sviluppato a livello internazionale, esclusiva JAERI (Giappone) che possiede il brevetto e si occupa dello sviluppo
- Condizioni di funzionamento del sistema molto gravose
- Ancora necessarie delle penetrazioni per utilizzare la testa del RPV come struttura di supporto.
- ✓ Il sistema è analogo alla tipologia tradizionale con la differenza di aver portato all'interno del RPV il sistema di controllo e movimentazione.

SOLUZIONE C

- + Possibilità, per soluzioni integrate che prevedono pressurizzatore INV nella testa del RPV, di utilizzare la base del pressurizzatore come struttura di sostegno evitando completamente penetrazioni nella testa del RPV
- + Molto studiato a livello internazionale anche se con modalità applicative leggermente differenti (in Cina è in funzione un piccolo reattore a pool che prevede il CRDM di tipo idraulico)
- Necessario prevedere piccole penetrazioni per l'alimentazione idraulica del sistema
- Necessità di prevedere altre componenti all'esterno del RPV per il funzionamento del meccanismo (pompe, valvole e appositi circuiti).

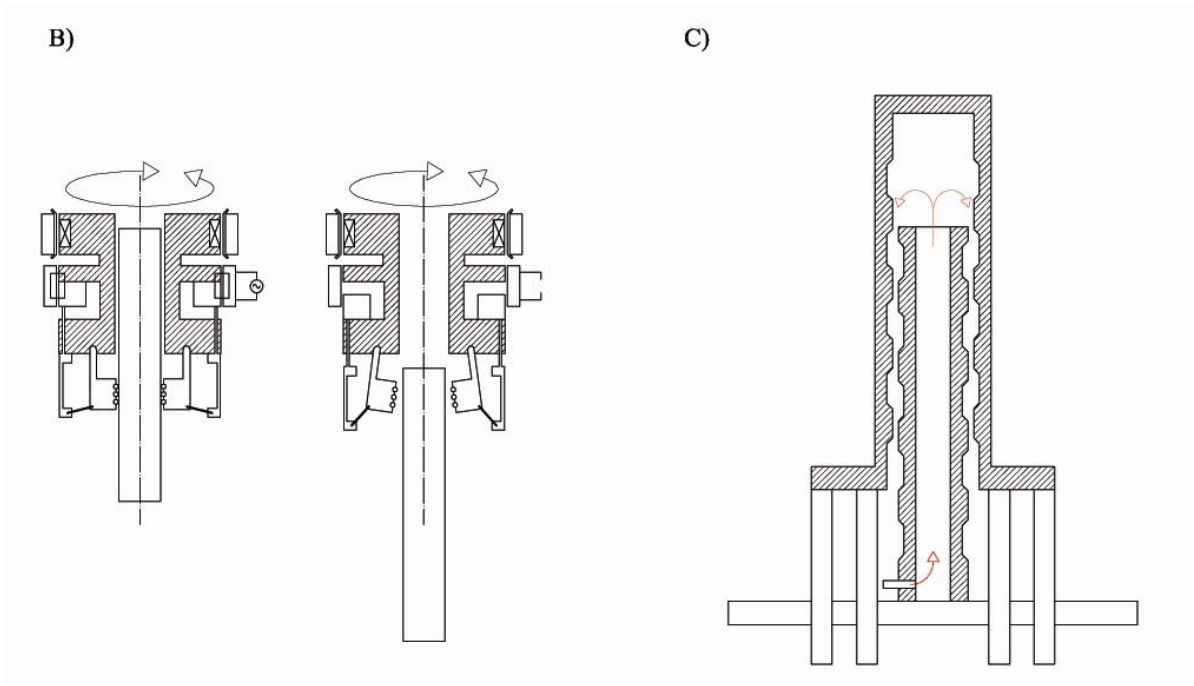
CLASSIFICAZIONE

²² Il sistema KLT-40C funziona in assenza di boro disciolto nel primario pertanto il sistema di movimentazione delle barre di controllo, che deve compensare la riduzione della reattività per burn-up, deve avere una buona capacità di regolazione fine.

Tab. 20. Classificazione delle soluzioni adottate per lo spegnimento rapido del reattore

SPEGNIMENTO RAPIDO (FSS)								
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	NHR-5 ²³	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO						LOOP	
semplicità e limitazione costi	alto	alto	basso	basso	basso	alto	basso	basso
facilità di manutenzione	medio	medio	basso	basso	alto	medio	alto	alto
esperienza sulla tecnologia	medio	medio	basso	basso	alto	medio	alto	alto
riduzione delle penetrazioni	alto	alto	medio	medio	basso	alto	basso	basso
sigla	C	C	B	B	A	C	A	A
Classificazione unica	1°	1°	3°	3°	2°	1°	2°	2°

SCHEMI SOLUZIONI



²³ Il reattore NHR-5 è stato aggiunto in questa analisi poiché è un impianto effettivamente operativo in Cina e prevede il CRDM di tipo idraulico.

SPEGNIMENTO DI EMERGENZA (SSS)

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 21. Definizione delle soluzioni adottate per il sistema di spegnimento secondario

REATTORE	SPEGNIMENTO DI EMERGENZA	SIGLA
MARS	Dilatazione termica differenziale (sistema passivo su T_{MAX})	B
CAREM	Iniezione di acqua borata su fallimento del FSS	A
MRX	Iniezione di acqua borata su indisponibilità del FSS	A
PSRD	Saturazione del flusso magnetico (sistema passivo su T_{MAX})	C
IRIS	Iniezione di acqua borata in pressione	A
KLT-40C	Iniezione di un assorbitore liquido ($CdNO_3$)	A
SMART	Iniezione di acqua borata attraverso l'apposita pompa	A

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

- A) Iniezione di acqua borata
- B) Dilatazione termica differenziale
- C) Saturazione del flusso magnetico

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- L'iniezione di acqua borata in pressione prevede l'intervento di apposite pompe e/o valvole.
- Lo spegnimento del reattore, in seguito all'iniezione dell'acqua borata, non è istantaneo. È necessario un certo tempo perché venga inserita una sufficiente quantità dell'assorbitore.

SOLUZIONE B

- + Sistema completamente passivo.
- + Eliminati da progetto incidenti ATWS.
- ✓ Attraverso sufficiente dilatazione termica differenziale di due cilindri concentrici, costruiti con differenti metalli, che si verifica al superamento di una T_{MAX} definita di progetto, le barre di controllo cadono per gravità all'interno del nocciolo.

SOLUZIONE C

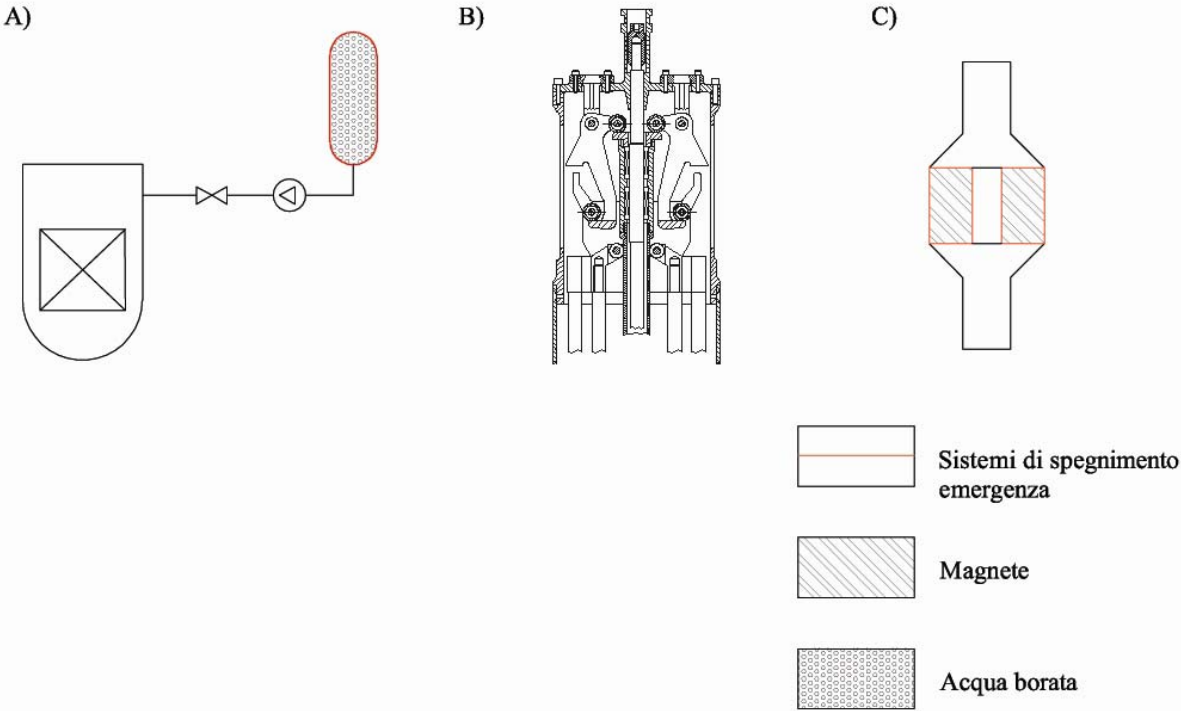
- + Sistema completamente passivo.
- + Il sistema può essere applicato alle stesse barre di sicurezza senza necessità di prevedere un apposito banco di barre passive (riduzione volume).
- + Eliminati da progetto incidenti ATWS.
- ✓ Attraverso la saturazione del flusso magnetico, al di sopra della T_{Curie} del materiale scelto per il magnete di controllo, il sistema di magneti, che tiene connesse le barre di controllo all'albero di movimentazione sovrastante, cessa di esercitare una forza attrattiva tale da tenere unite le due parti causando l'inserimento delle barre per gravità all'interno del nocciolo.

CLASSIFICAZIONE

Tab. 22. Classificazione delle soluzioni adottate per lo spegnimento in emergenza

SPEGNIMENTO IN EMERGENZA (SSS)							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	basso	basso	basso	alto	basso	alto	basso
Livello di passività del sistema	basso	basso	basso	alto	basso	alto	basso
riduzione dei volumi occupati	basso	basso	basso	alto	basso	medio	basso
sigla	A	A	A	C	A	B	A
Classificazione unica	3°	3°	3°	1°	3°	2°	3°

SCHEMI SOLUZIONI



PROTEZIONE DA LOCA

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 23. Definizione delle soluzioni adottate per eliminare l'evento di LOCA

REATTORE	PROTEZIONE DA LOCA	SIGLA
MARS	Contenimento in pressione pieno di acqua con pressione circa pari a quella del primario (leggermente inferiore alla pressione del primario)	A
CAREM	Soluzione integrata e riduzione del diametro delle penetrazioni (SBLOCA)	B
MRX	Soluzione integrata, riduzione del diametro delle penetrazioni (SBLOCA) e contenimento pieno di acqua in pressione (molto minore della pressione del primario) di piccole dimensioni	C
PSRD	Soluzione integrata, riduzione del diametro delle penetrazioni (SBLOCA) e contenimento pieno di acqua in pressione (molto minore della pressione del primario) di piccole dimensioni	C
IRIS	Soluzione integrata, riduzione del diametro delle penetrazioni (SBLOCA), grande quantitativo di acqua primaria e piccolo contenimento in pressione (con aria a pressione molto minore di quella del primario) di piccole dimensioni	D
KLT-40C	Minimizzazione della lunghezza delle tubazioni primarie e riduzione del diametro	E
SMART	Soluzione integrata e riduzione del diametro delle penetrazioni (SBLOCA)	B

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + Il contenimento alla stessa pressione del primario evita completamente incidenti di LOCA e RIA dovuto all'espulsione di una barra di controllo
- + Possibilità di sfruttare il principio del leak-before-break grazie al ridotto flusso nel contenimento durante il normale esercizio
- + Nell'utilizzo su un sistema integrato le tubazioni del primario che attraversano in contenimento non sono sottoposte a sforzi, eventuali tubazioni secondarie saranno invece sottoposte a compressione con conseguente riduzione della probabilità di rottura.

SOLUZIONE B

- ✓ La soluzione integrata consente di avere penetrazioni in prevalenza relative al circuito secondario, non danno luogo a LOCA.
- ✓ Utilizzare SG INV richiede che questi siano distribuiti equamente nello spazio anulare, richiedendo penetrazioni secondarie per ciascun generatore di vapore (numerosi) ma di dimensioni decisamente ridotte.

SOLUZIONE C

- ✓ Soluzione integrata consente di avere penetrazioni in prevalenza relative al circuito secondario.
- ✓ Utilizzare SG INV richiede che questi siano distribuiti equamente nello spazio anulare, richiedendo penetrazioni secondarie per ciascun generatore di vapore (numerosi) ma di dimensioni decisamente ridotte.
- ✓ L'impiego del contenimento in pressione pieno d'acqua, non riduce di per se la probabilità di verificarsi di un evento di LOCA ($\Delta p \cong 80$ bar) ma, date le ridotte dimensioni, consente di raggiungere in breve tempo l'equilibrio delle pressioni e l'arresto della fuoriuscita del refrigerante primario.

SOLUZIONE D

- + Aumentando il quantitativo di refrigerante nel primario si ha a disposizione tempo maggiore prima che si verifichi l'asciugamento del nocciolo.
- + Il sistema di depressurizzazione, previsto all'interno del RPV fa sì che, a seguito del LOCA, la pressione diminuisca a partire dal RPV e che, il refrigerante uscito dal primario a seguito dello

stesso incidente, inverte il verso di efflusso entrando nel RPV (dovuto all'inversione del gradiente di pressione).

- ✓ Soluzione integrata consente di avere penetrazioni in prevalenza relative al circuito secondario.
- ✓ Utilizzare SG INV richiede che questi siano distribuiti equamente nello spazio anulare, richiedendo penetrazioni secondarie per ciascun generatore di vapore ma di dimensioni decisamente ridotte.
- ✓ Il contenimento in pressione esterno al RPV è pieno di aria ma date le ridotte dimensioni consente di raggiungere velocemente l'equilibrio arrestando la perdita di refrigerante primario.

SOLUZIONE E

- + La tipologia di connessioni con il RPV consente di sfruttare il principio del leak-before-break.
- ✓ La riduzione del LOCA è dovuta alla minimizzazione delle tubazioni del primario e alla riduzione del diametro delle stesse.

CLASSIFICAZIONE

Tab. 24. Classificazione delle soluzioni adottate per la protezione dall'incidente di LOCA

PROTEZIONE DA LOCA							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi ²⁴	medio- basso	medio-basso	basso	basso	medio-basso	medio	alto
riduzione della necessità di manutenzione	alto	alto	alto	alto	alto	alto	alto
facilità di manutenzione in caso di guasto	medio	medio	basso	basso	medio-basso	basso	medio-alto
facilità di ISI	medio- alto	medio	medio-basso	medio-basso	medio	medio-basso	medio
riduzione evento LOCA	medio	alto	alto	alto	medio	alto	medio
sigla	B	D	C	C	B	A	E
Classificazione	2°	1°	1°	1°	2°	1°	2°

²⁴ I costi di cui si è tenuto conto sono quelli relativi al sistema di protezione del LOCA, è necessario fare attenzione per valutare correttamente questa voce. Un sistema integrato presenterà costi decisamente superiori rispetto ad un sistema come quello del KLT-40C con la differenza che un reattore integrato presenta vantaggi ulteriori attraverso l'utilizzo della stessa soluzione. L'impianto KLT-40C sfrutta la minimizzazione della tubazione primaria per ridurre il LOCA, l'impianto IRIS utilizza un sistema integrato che consente contemporaneamente di eliminare anche l'incidente di RIA dovuto all'espulsione di una barra di controllo.

PROTEZIONE DA CONTROL ROD EJECTION

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 25. Definizione delle soluzioni adottate per eliminare l'espulsione incontrollata delle barre di controllo

REATTORE	PROTEZIONE CONTROL ROD EJECTION	SIGLA
MARS	Doppio contenimento in pressione	B
CAREM	CRDM – INV	A
MRX	CRDM – INV (penetrazioni residue)	A
PSRD	CRDM – INV (penetrazioni residue)	A
IRIS	CRDM – INV	A
KLT-40C	-	-
SMART	-	-

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

- A) CRDM – INV
- B) Contenimento in pressione

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + Viene eliminato completamente l'incidente di espulsione delle barre di controllo grazie al meccanismo CRDM INV (per motivi strutturali le soluzioni degli impianti MRX e PSRD presentano ancora delle penetrazioni di testa).

SOLUZIONE B

- + Doppio contenimento pieno di acqua alla pressione del primario consente ai tubi (penetrazioni) del CRDM all'esterno del RPV di lavorare in assenza di sollecitazioni (causa di rottura). Inoltre, qualora si avesse la rottura, l'uguaglianza delle pressioni, tra RPV e CPP, è esclusa la possibilità di espulsione incontrollata.

CLASSIFICAZIONE

Tab. 26. Classificazione delle soluzioni per eliminare l'incidente di espulsione delle barre di controllo

PROTEZIONE DA CONTROL ROD EJECTION							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	alto	alto	medio-alto	medio-alto	-	alto	-
esperienza sulla tecnologia	medio	medio	basso	basso	-	medio-alto	-
riduzione evento Control Rod Ejection	alto	alto	medio-alto	medio-alto	-	alto	-
sigla	A	A	A	A		B	
Classificazione	1°	1°	2°	2°	-	1°	-

LIMITAZIONE DELLA PRESSIONE DEL PRIMARIO

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 27. Definizione soluzioni proposte per limitare la pressione del primario

REATTORE	LIMITAZIONE DELLA PRESSIONE DEL PRIMARIO	SIGLA
MARS	Spruzzatori del pressurizzatore	A1
CAREM	Valvole di sicurezza e RHRS con condensatore nella piscina di raffreddamento (sistema autopressurizzato)	B1
MRX	Spruzzatori del pressurizzatore	A1
PSRD	Se la pressione sale troppo si spegne il reattore e si avvia EDRS che abbassa la temperatura e quindi la pressione (sistema autopressurizzato)	B2
IRIS	Transitori in cui si ha aumento di pressione sono compensati dal grande volume di vapore presente nel pressurizzatore	A2
KLT-40C	Riduzione del volume di gas nel pressurizzatore	A3
SMART	Il grande volume del pressurizzatore risponde a transitori di pressione grazie anche all'ausilio dell'apposito sistema di refrigerazione	A4

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

A) Con pressurizzatore

- 1) A bolla di vapore
- 2) A bolla di vapore senza spruzzatori
- 3) A gas
- 4) A gas ed acqua (vapore + liquido)

B) Senza pressurizzatore

- 1) Circuito di condensazione del vapore
- 2) Circuito di raffreddamento del refrigerante primario in fase liquida

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A1

- + Il controllo della pressione si ottiene in volumi ridotti
- ✓ Necessità di prevedere spruzzatori

SOLUZIONE A2

- + Assenza di spruzzatori, i transitori sono ammortizzati dalla compressione del vapore.
- Necessità di predisporre grande volume per il pressurizzatore, si ha un conseguente aumento del volume del RPV e quindi dei costi.

SOLUZIONE A3

- Necessità di prevedere sistemi ausiliari sulla linea del gas
- È preferibile l'applicazione esterna del pressurizzatore a gas anche in soluzioni integrate in questo modo rimane presente una linea primaria in uscita dal RPV dove si può avere LOCA.

SOLUZIONE A4

- Tipologia non convenzionale (poco usata)
- Necessità di prevedere oltre agli ausiliari gas anche sistema di refrigerazione per ridurre la pressione parziale del vapore e quindi la pressione totale del sistema attraverso apposite penetrazioni

SOLUZIONE B1

- Necessità di prevedere penetrazioni di testa, per l'asportazione del vapore, e lungo il downcomer, per inserire il condensato.

SOLUZIONE B2

- Necessità di spegnere il reattore e refrigerare con sistema di rimozione del calore residuo di decadimento (il sistema lavora alla pressione di saturazione)

CLASSIFICAZIONE

Tab. 28. Classificazione delle soluzioni adottate per la limitazione della pressione del primario

LIMITAZIONE DELLA PRESSIONE DEL PRIMARIO							
critério di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	medio	alto	medio	basso	medio-alto	medio	medio
esperienza sulla tecnologia	medio	medio-alto	alto	medio	basso	alto	medio-alto
sigla	B1	A2	A1	B2	A4	A1	A3
Classificazione	4°	1°	2°	6°	5°	1°	2°

DEPRESSURIZZAZIONE DEL PRIMARIO

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 29. Definizione soluzioni adottate per la depressurizzazione del primario

REATTORE	DEPRESSURIZZAZIONE DEL PRIMARIO	SIGLA
MARS	Valvole di sicurezza del pressurizzatore	A1
CAREM	Valvole di sicurezza e sistema di condensazione di emergenza	A2
MRX	Valvole di sicurezza del pressurizzatore	A1
PSRD	Valvole di sicurezza del RPV	A1
IRIS	Valvole di sicurezza del pressurizzatore (RPV) e sistema ADS	A2
KLT-40C	Valvole di sicurezza	A1
SMART	Valvole di sicurezza del pressurizzatore	A1

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

A) Con rilascio di massa di refrigerante

- 1) Attraverso apertura valvole
- 2) Attraverso apertura valvole in ausilio a sistemi di depressurizzazione INV

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A1

- Parte della massa del refrigerante primario è rilasciata all'esterno del RPV sottoforma di vapore per ridurre il quantitativo di energia INV.
- Si ha riduzione del quantitativo di refrigerante primario

SOLUZIONE A2

- + Il sistema di depressurizzazione in vessel consente di ridurre la pressione senza avere perdita di massa di refrigerante primario (riduzione della necessità di eventuale reintegro²⁵)
- In aggiunta sono previsti tradizionali sistemi con apertura delle valvole di sicurezza e rilascio di massa

CLASSIFICAZIONE

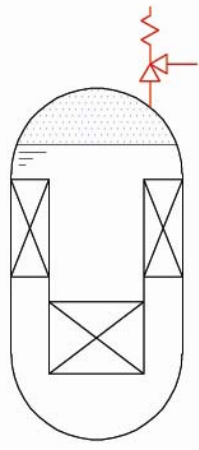
Tab. 30. Classificazione delle soluzioni adottate per l'iniezione di acqua nel primario

DEPRESSURIZZAZIONE DEL PRIMARIO							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	medio	medio	alto	alto	alto	alto	alto
conservazione massa nel primario	alto	alto+	medio	medio	medio	medio	medio
sigla	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1
Classificazione	2°	1°	2°	2°	2°	1°	1°

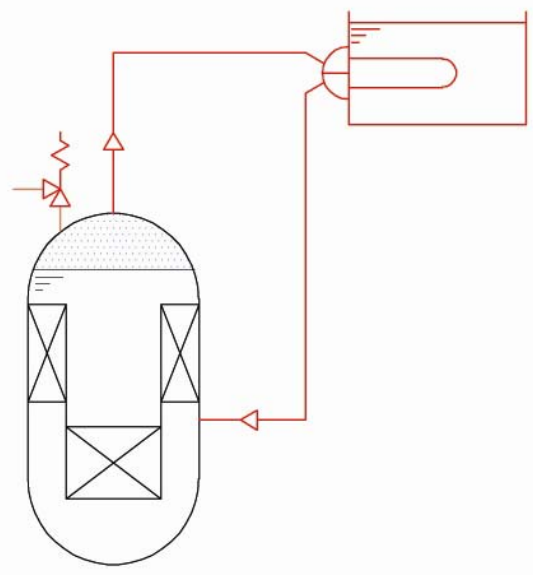
²⁵ Questo sistema è utilizzato in seguito a situazioni incidentali dove si ha perdita di refrigerante primario e gli SG vengono a trovarsi a contatto con il vapore da poter condensare (es. a seguito di evento di LOCA)

SCHEMI SOLUZIONI

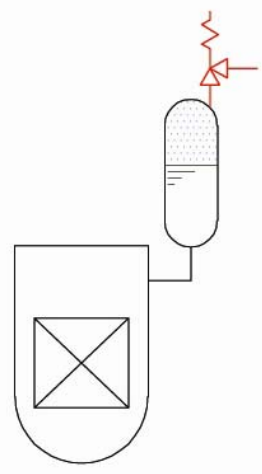
A1)



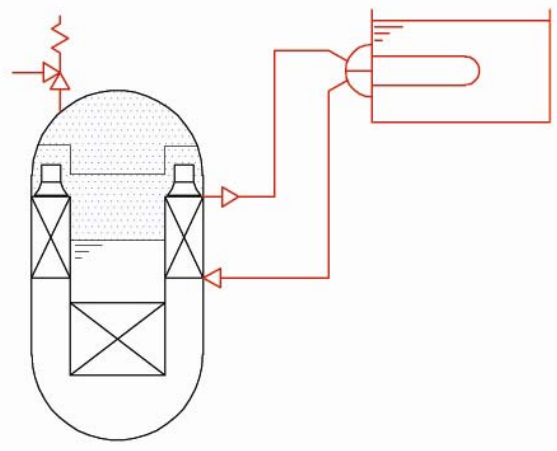
A2)





A1)



A2)



 Sistemi di depressurizzazione

 Vapore

INIEZIONE DI REFRIGERANTE NEL PRIMARIO

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 31. Definizione delle soluzioni previste per l'iniezione di acqua nel primario

REATTORE	INIEZIONE ACQUA NEL PRIMARIO	SIGLA
MARS	Non è previsto sistema di iniezione grazie alla presenza del contenimento pieno di acqua in pressione	A
CAREM	Sistema di alimentazione di emergenza e iniezione acqua borata	B
MRX	Non è previsto sistema di iniezione grazie alla presenza del contenimento pieno di acqua in pressione	A
PSRD	Non è previsto sistema di iniezione grazie alla presenza del contenimento pieno di acqua in pressione	A
IRIS	Sistemi EBT per iniezione acqua borata, per l'allagamento a lungo termine è previsto prelievo da cavità reattore e inserimento nel RPV attraverso DVI (Direct Vessel Injection)	C
KLT-40C	Sistemi di alimentazione di emergenza e iniezione acqua con assorbitore liquido	B
SMART	Sistemi di alimentazione di emergenza e iniezione acqua borata	B

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

- A) Assenza di sistemi di iniezione di emergenza
- B) Sistemi di alimentazione di emergenza e iniezione di acqua borata
- C) Sistemi di iniezione di acqua borata e iniezione passiva a lungo termine di acqua nel RPV

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- + Semplicità impiantistica e riduzione costi
- + Sistema di allagamento garantito passivamente

SOLUZIONE B

- Sistemi attivi
- Necessità di componenti impiantistiche aggiuntive

SOLUZIONE C

- + Sistema attivo (EBT) e sistema passivo
- ✓ Non utilizzabile il sistema passivo in soluzioni con contenimento esterno pieno di acqua in pressione

CLASSIFICAZIONE

Tab. 32. Classificazione delle soluzioni applicate per l'iniezione del refrigerante primario

INIEZIONE REFRIGERANTE NEL PRIMARIO							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	medio	medio	alto	alto	medio	alto	medio
passività del sistema	basso	medio	alto	alto	basso	alto	basso
sigla	B	C	A	A	B	A	B
Classificazione	3°	2°	1°	1°	3°	1°	2°

PROTEZIONE DALL'INCIDENTE DI DILUIZIONE DEL BORO

RIEPILOGO DELLE DIFFERENTI SOLUZIONI PROPOSTE

Tab. 33. Definizione soluzioni per eliminare l'incidente di diluizione del boro

REATTORE	CONTROLLO DILUIZIONE DEL BORO	SIGLA
MARS	Sistema di diluizione del boro di tipo tradizionale	A
CAREM	Non è previsto l'utilizzo del boro in normale funzionamento	B
MRX	Non è previsto l'utilizzo del boro in normale funzionamento	B
PSRD	Non è previsto l'utilizzo del boro in normale funzionamento	B
IRIS	Sistema di diluizione del boro di tipo tradizionale	A
KLT-40C	Non è previsto l'utilizzo del sistema di controllo della reattività con boro liquido in normale funzionamento	B
SMART	Non è previsto l'utilizzo del boro in normale funzionamento	B

TIPOLOGIE DIFFERENTI E DEFINIZIONE DELLA SIGLA

- A) Sistema di diluizione del boro uguale a quelli normalmente usati nei PWR commerciali
- B) Non viene utilizzato il boro nel normale esercizio

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE DI CIASCUNA SOLUZIONE

SOLUZIONE A

- È possibile avere incidente di RIA dovuto alla diluizione del boro nel primario
- Presenta un sistema in cui circola refrigerante primario e in cui si può avere rottura della tubazione con conseguente LOCA

SOLUZIONE B

- + Eliminato di progetto incidente di RIA dovuto alla diluizione del boro
- + Il sistema di gestione del boro, intercettato durante il normale funzionamento, riduce la probabilità di avere LOCA

CLASSIFICAZIONE

Tab. 34. Classificazione delle soluzioni per eliminazione incidente di diluizione del boro

PROTEZIONE DALL'INCIDENTE DI DILUIZIONE DEL BORO							
criterio di giudizio	CAREM	IRIS	MRX	PSRD	SMART	MARS	KLT-40C
	INTEGRATO					LOOP	
semplicità e limitazione costi	alto	basso	alto	alto	alto	basso	alto
facilità di manutenzione	alto	medio	alto	alto	alto	medio	alto
sigla	B	A	B	B	B	A	B
Classificazione unica	1°	2°	1°	1°	1°	2°	1°

CONCLUSIONI SULLO STUDIO EFFETTUATO

VALUTAZIONE DEGLI IMPIANTI ANALIZZATI

Un eventuale studio preventivo per lo sviluppo di un progetto di un impianto nucleare, dotato di un reattore ad acqua in pressione (PWR) di piccola taglia, non può prescindere da un'accurata analisi degli impianti analoghi già proposti in ambito internazionale e precedentemente analizzati.

Al termine dell'analisi effettuata, si sono individuate delle caratteristiche, comuni ai diversi progetti, che devono essere tenute in considerazione. Questi aspetti devono essere considerati come un punto di partenza per un eventuale nuovo progetto preliminare poiché la scelta di analoghe soluzioni, all'interno di progetti differenti, è indice della validità delle stesse. Per alcune soluzioni gli impianti MARS e KTL-40C possono presentare soluzioni differenti rispetto agli altri progetti rispettivamente perché la fase di sviluppo del primo è iniziata diversi anni prima degli altri ed il secondo perché è direttamente derivato da una soluzione già esistente applicata sulle navi rompighiaccio di fabbricazione russa, anch'essa risalente a diversi anni prima.

Per quanto riguarda soluzioni comuni ai diversi progetti, quella che risulta immediatamente evidente è l'utilizzo di una struttura di tipologia integrata che, consentendo di minimizzare il volume globalmente interessato dal circuito primario, porta vantaggi in termini di riduzione dei costi sia diretti che indiretti²⁶.

Alcuni impianti, tra quelli analizzati, presentano un maggior numero di aspetti interessanti anche perché caratterizzati da progetti con stadi più avanzati di sviluppo; altri, a causa dello stadio meno maturo del progetto, presentano diversi aspetti che possono dar luogo a sviluppi e miglioramenti futuri. Nell'analisi si sono individuati alcuni aspetti di particolare interesse che si presentano come punti da tenere in considerazione come basi per un nuovo progetto, ed altri aspetti che presentano possibili linee di sviluppo che potrebbero dar luogo a dei miglioramenti nel sistema.

ASPETTI DI PARTICOLARE PREGIO SU CUI PUNTARE

Si vuole qui porre l'attenzione su alcuni aspetti che risultano particolarmente interessanti poiché consentono di ottenere importanti semplificazioni impiantistiche o la riduzione delle probabilità di accadimento di alcuni specifici eventi incidentali. Di seguito si riporta un elenco di alcuni aspetti che saranno trattati nel dettaglio:

- Impiego di generatori di vapore di tipologia OT per la produzione di vapore surriscaldato (indipendentemente dalla specifica soluzione adottata: elicoidali, dritti, ...);
- Controllo della reattività, durante il normale funzionamento, effettuato senza utilizzo di boro disciolto nel refrigerante primario (possibilità di utilizzare il boro disciolto, in alte concentrazioni, come soluzione di back-up alle normali barre di controllo, per l'arresto rapido del reattore);
- Riduzione delle penetrazioni nel recipiente in pressione primario utilizzando gli stessi SG per l'asportazione del calore di decadimento residuo;
- Asportazione del calore prodotto all'interno del nocciolo, anche durante il normale funzionamento, attraverso il deflusso di refrigerante primario in circolazione naturale.

GENERATORI DI VAPORE OT

Con riferimento ad impianti di tipo PWR, per i reattori di piccola taglia e, nell'ottica di incrementare il rendimento, si utilizzano delle piccole turbine a vapore, in grado di elaborare lo stesso in condizioni di surriscaldamento. Date le modalità di produzione del vapore negli impianti PWR, il grado di surriscaldamento del vapore, ottenibile lato secondario, è limitato (dell'ordine di alcune decine di gradi al di sopra della temperatura di saturazione) ed è vincolato proprio dalla pressione di esercizio adottata lato refrigerante primario. L'impiego di generatori di vapore di tipo OT, consente di ottenere diversi vantaggi, a partire

²⁶ Con riduzione dei costi diretti si intende quella componente di costo che per come è fatto l'impianto, assenza di determinate strutture e componenti, non è più presente (es. i costi legati all'acquisto e alla fabbricazione delle tubazioni dei loop di circolazione primaria), con riduzione dei costi indiretti si intende invece la riduzione dei costi dovuti all'assenza di strutture e componenti che non fanno direttamente parte del circuito primario, ma dal quale dipendono fortemente. Come esempio si pensi alla predisposizione di opportuni schermi, per minimizzare la dose associata al personale dell'impianto, che dipende dal layout del primario; quindi l'assenza dei loop di circolazione del primario non rende più necessario prevedere appositi schermi.

dall'accoppiamento di questa soluzione con la struttura integrata del recipiente in pressione che consente di avere una grande inerzia termica, non più presente lato secondario. A differenza degli impianti PWR tradizionali, dove l'inerzia termica del sistema, per rispondere ai transitori operazionali ed incidentali, è assicurata dal grande quantitativo di acqua all'interno del generatore di vapore, negli impianti con struttura integrata e SG OT questa deve necessariamente essere garantita dal grande quantitativo di refrigerante primario presente all'interno del recipiente in pressione.

Adottando questa soluzione, oltre ad ottenere un maggiore rendimento in turbina per l'impiego di vapore surriscaldato si ottiene una riduzione dei componenti necessari per la produzione del vapore. È evidente che, grazie all'impiego di generatori di vapore OT, non saranno presenti né i separatori a ciclone né gli essiccatori ed inoltre, disponendo gli stessi all'interno del recipiente in pressione, non è necessario neanche che il mantello del generatore di vapore abbia spessori dimensionati per resistere alla pressione del primario.

Le semplificazioni, che derivano da questa soluzione progettuale, sono accompagnate da alcune complicazioni come ad esempio la progettazione dei bocchelli per la penetrazione del RPV da parte delle linee dell'acqua di alimento e del vapore; A differenza dei tradizionali impianti PWR, dove i bocchelli previsti, attraverso il vessel erano necessari per l'ingresso e l'uscita del refrigerante primario, in questo caso, a dover attraversare il RPV è il refrigerante secondario; per far questo è necessario prevedere un apposito bocchello che possa assicurare la tenuta da entrambi i lati del vessel.

ASSENZA DI BORO DISCIOLTO DURANTE IL NORMALE FUNZIONAMENTO

Nei tradizionali impianti PWR, il controllo della reattività, durante il normale funzionamento dell'impianto è effettuato attraverso la movimentazione delle barre di controllo e, contemporaneamente attraverso la regolazione della concentrazione del boro disciolto nel refrigerante primario. Nei reattori di taglia ridotta le minori dimensioni che caratterizzano il nocciolo consentono di effettuare il controllo della reattività attraverso la sola movimentazione delle barre di controllo. Per ovviare all'eccesso di reattività che caratterizza il combustibile ad inizio vita, si prevede che alcune barrette di combustibile siano composte, parzialmente, da veleni bruciabili. Una volta terminati i veleni bruciabili (a causa della loro grandissima sezione d'urto di cattura hanno una vita limitata rispetto al resto del nocciolo) la gestione della reattività viene effettuata esclusivamente attraverso la sola movimentazione delle barre di controllo.

Una soluzione che non utilizza boro durante il normale funzionamento consente di non prevedere i sistemi per il controllo e la gestione della chimica del refrigerante primario. L'assenza di boro, che richiederebbe un costante spillamento del refrigerante primario per la regolazione della concentrazione dello stesso, garantisce una semplificazione dei sistemi ed anche una declassificazione²⁷ degli stessi. Un sistema per la purificazione del refrigerante primario deve essere in ogni caso previsto ma il suo funzionamento può essere limitato ad alcuni periodi prestabiliti che consentono di ridurre enormemente la probabilità di guasto, fermo restando che il fallimento di tale sistema non può in alcun modo dar luogo ad incidenti di reattività.

In impianti di questo tipo, il boro è generalmente impiegato come sistema secondario per lo spegnimento rapido del reattore. Qualora risultasse necessario l'utilizzo di boro per l'arresto del reattore, il sistema di purificazione del refrigerante primario dovrà provvedere successivamente al ripristino delle condizioni chimiche iniziali pur non avendo, questo, funzioni rilevanti ai fini della sicurezza.

UTILIZZO DEI GENERATORI DI VAPORE COME SCAMBIATORI DI CALORE PER IL SISTEMA ECCS

Negli impianti nucleari devono essere previsti appositi sistemi predisposti per l'asportazione del calore di decadimento prodotto all'interno del nocciolo a seguito di un suo spegnimento. Per rispondere a questa esigenza sono previsti sistemi, analoghi allo RHRS (Residual Heat Removal System) che funzionano in condizioni di emergenza. Per tali sistemi, che devono essere interfacciati con il circuito primario, devono essere previste apposite linee con le rispettive penetrazioni. La rottura di una linea di tali sistemi può dar luogo ad un evento di LOCA che però vuole essere ridotto in fase di progetto, di frequenza e magnitudo.

²⁷ Il fallimento del sistema di controllo della chimica, che comunque deve essere presente per garantire che il refrigerante primario sia caratterizzato da parametri chimici compresi all'interno di un determinato range, non rientra negli incidenti base di progetto e pertanto può essere caratterizzato da una classe impiantistica inferiore.

Una soluzione interessante, che punta alla riduzione della probabilità di accadimento di un evento di LOCA, è di utilizzare le stesse penetrazioni delle linee vapore ed acqua di alimento a tale scopo. Il calore di decadimento prodotto all'interno del nocciolo è rilasciato al refrigerante primario, che in condizioni di emergenza defluisce generalmente in circolazione naturale, viene asportato dagli stessi generatori di vapore che, non più connessi alla turbina, si trovano in comunicazione con un apposito scambiatore di calore esterno al fine di rilasciare il calore al pozzo di calore ultimo (atmosfera). Per poter attuare una soluzione di questo tipo è necessario che i generatori di vapore siano caratterizzati da una superficie di scambio sufficiente sia per la produzione del vapore durante il normale funzionamento che per l'asportazione del calore di decadimento in condizioni di emergenza (tenendo conto della riduzione della portata di circolazione e, conseguentemente, dei coefficienti di scambio termico che si accompagnano ad una minore potenza da asportare). Un'ulteriore condizione incidentale deve essere prevista qualora, durante il normale funzionamento del sistema di produzione del vapore, si abbia l'avviamento di tale sistema di rimozione del calore di decadimento residuo in condizioni di emergenza. L'avviamento dello ECCS durante il normale funzionamento porta ad un'eccessiva refrigerazione del primario che, a causa dei coefficienti di reattività del moderatore, può generare una condizione di sovrapotenza. Una soluzione in cui il primo tratto delle linee nel vapore ed acqua di alimento è comune agli SG e allo ECCS fa sì che non si possa avere un funzionamento contemporaneo dei due sistemi, scongiurando automaticamente la possibilità di avere condizioni di sovrapotenza.

L'applicazione di un sistema di questo tipo richiede, necessariamente, l'impiego di valvole per allineare in maniera opportuna i diversi sistemi che compongono lo ECCS (le linee dell'acqua di alimento e del vapore devono essere connesse allo scambiatore di calore del sistema ECCS piuttosto che con la turbina come invece avviene durante il normale funzionamento). Come si evidenzierà in seguito vengono generalmente utilizzate, a questo scopo, valvole passive di classe D che possono essere sviluppate ulteriormente per raggiungere la classe C secondo la classificazione IAEA, al fine di consentire al sistema di essere completamente passivo (non c'è la necessità di prevedere l'apertura delle valvole attraverso un'alimentazione esterna).

REFRIGERANTE PRIMARIO IN CIRCOLAZIONE NATURALE DURANTE IL NORMALE FUNZIONAMENTO

Per avere un notevole guadagno in termini di semplificazione impiantistica e di manutenzione si può prevedere l'eliminazione delle pompe di circolazione primaria. Il vantaggio dato dall'assenza delle pompe di circolazione è necessariamente accompagnato da alcuni svantaggi infatti, in assenza di tali pompe il refrigerante primario, in circolazione naturale, sarà caratterizzato da una portata in massa più piccola. A parità di potenza prodotta dal nocciolo si avrà una maggiore differenza di temperatura, necessaria questa per l'istaurarsi della circolazione naturale. Entrambi i sistemi analizzati, che adottano la circolazione naturale durante il normale funzionamento dell'impianto, sono dotati di un sistema di pressurizzazione automatico in cui la pressione di esercizio è data dalla pressione di saturazione corrispondente alla temperatura del refrigerante primario in uscita dal nocciolo. In tali condizioni è evidente che il refrigerante primario all'uscita del nocciolo raggiunge condizioni prossime alla saturazione e pertanto, il raggiungimento della condizione di DNB può essere più frequente rispetto agli impianti dotati di pressurizzatore.

ASPETTI INTERESSANTI IN CUI SI È EVIDENZIATA LA POSSIBILITÀ DI UN MIGLIORAMENTO

Insieme agli aspetti di particolare pregio, che sono stati individuati nel corso dell'analisi, ne esistono altri che, comunque interessanti, si prevede possano aver bisogno di ulteriori sforzi in termini di ricerca e sviluppo per poter essere meglio utilizzati. È evidente che, data la diretta derivazione di questi impianti di piccola taglia da reattori tradizionali di tipo PWR, i possibili miglioramenti non riguardano in alcun modo la garanzia di corretto funzionamento dell'impianto, quanto invece alcuni aspetti che possano consentire di semplificare il sistema impiantistico mantenendo inalterati i già elevati standard di sicurezza nucleari. In particolare si farà riferimento a sistemi che, caratterizzati da ratei di guasto minori, consentano di ottenere gli stessi standard di sicurezza attraverso una minore ridondanza dei sistemi stessi. Nello specifico si vogliono analizzare soluzioni che tendano ad annullare gli incidenti dovuti a guasti o ad errori umani, questi ultimi

percentualmente molto rilevanti ai fini delle frequenze di accadimento. Alcuni esempi sono riportati di seguito:

- Prevedere la possibilità di utilizzare, all'interno dell'impianto, sistemi passivi di classe C in sostituzione di quelli di classe D;
- Prevedere che il sistema di spegnimento secondario, piuttosto che sull'intervento attivo di pompe e valvole, si basi su leggi fisiche ineludibili attraverso l'adozione di opportuni sistemi;
- Studiare in fase progettuale la possibilità, seppur remota, di accadimento di un incidente severo e le opportune strategie per la gestione del corium fuso attraverso la ritenzione all'interno del vessel;
- Prevedere una strategia analoga a quella dei PWR tradizionali nell'applicazione congiunta della stessa tipologia, standardizzata, di CRDM.

CONVERSIONE DEI SISTEMI PASSIVI DALLA CLASSE D ALLA CLASSE C

Nell'ottica in cui ci si è posti dall'inizio dell'analisi, di individuare i punti più interessanti da cui partire, nell'ipotesi di voler sviluppare un nuovo progetto di impianto di piccola taglia, un aspetto importante e che risulta migliorabile in alcuni progetti, è rappresentato dai sistemi di sicurezza passivi. Gli impianti nucleari di piccola taglia, così come gli impianti di dimensioni convenzionali, sono caratterizzati da sistemi rilevanti ai fini della sicurezza in grado di funzionare indipendentemente dall'intervento degli operatori presenti sull'impianto. La maggior parte degli impianti prevede che i sistemi passivi siano di classe D ovvero caratterizzati da un avviamento che necessita di alimentazione e dal successivo funzionamento effettivamente passivo e privo di alimentazione dall'esterno. In questo contesto risulta interessante effettuare un'analisi – costi/benefici – per valutare la possibilità di sostituire eventuali sistemi di classe D con altri, analoghi, caratterizzati anche dall'avviamento passivo (classe C).

L'effettiva convenienza va studiata in un'ottica d'impianto più generale poiché si dovrà tenere conto che, insieme alle semplificazioni derivanti dall'eliminazione di alcuni componenti, si presenteranno delle complicazioni progettuali derivanti dallo studio e dalla progettazione di un componente innovativo che deve essere sviluppato ad hoc.

SISTEMA SECONDARIO DI SPEGNIMENTO RAPIDO DEL REATTORE

Nell'ottica di voler rendere passivi i sistemi rilevanti ai fini della sicurezza, risulta interessante la possibilità di sviluppare soluzioni progettuali che possano consentire di garantire lo spegnimento rapido del reattore in condizioni di emergenza attraverso sistemi che non richiedono alimentazione esterna.

Due impianti in particolare, il MARS e il PSRD, prevedono che il sistema di spegnimento secondario sia basato su leggi fisiche ineludibili e pertanto classificati in classe C. I due progetti presentano soluzioni completamente differenti per quanto riguarda i fenomeni fisici su cui gli stessi si basano (il MARS è basato su fenomeni meccanici di dilatazione termica, il PSRD su fenomeni magnetici di saturazione del flusso) ma analoghe per quanto riguarda l'applicazione di tali sistemi direttamente alle barre di controllo.

Prevedere il sistema secondario di spegnimento rapido del reattore di tipo passivo (classe C) già dalla fase iniziale del progetto risulta relativamente semplice piuttosto che prevedere una modifica successiva al progetto per adattarlo ad un sistema di spegnimento non previsto dall'inizio.

PREVEDERE OPPORTUNE STRATEGIE PER LA GESTIONE DEL CORIUM FUSO ATTRAVERSO LA RITENZIONE ALL'INTERNO DEL VESSEL O IN LUOGHI APPOSITI

In tutti i progetti più recenti vengono studiate le sequenze incidentali complesse al fine di rendere l'impianto in grado di rispondere anche ad eventi caratterizzati da probabilità di accadimento evanescente. In particolare si studiano delle strategie che consentano di gestire il combustibile fuso mantenendolo all'interno del vessel o comunque in zone appositamente predisposte. Al fine di limitare le zone che risultano interessate dal nocciolo fuso, è preferibile adottare una strategia di ritenzione in vessel piuttosto che predisporre apposite zone al di fuori dello stesso. In particolare, per gli impianti di piccola taglia e con struttura integrata, la soluzione di ritenzione in vessel è da preferire grazie alla grande superficie della testa inferiore del vessel che consente di asportare il calore dall'esterno dello stesso. Come condizione

preliminare, affinché si possa ipotizzare l'asportazione del calore dalla superficie esterna del vessel, è necessario verificare che in presenza del nocciolo fuso, riallocato nella testa inferiore del vessel, si riesca ad asportare il calore di decadimento, prodotto dal nocciolo, senza raggiungere le condizioni di film boiling; in tal caso il vessel raggiungerebbe temperature molto elevate che comprometterebbero le proprietà meccaniche dello stesso.

Nelle fasi più avanzate dello studio una valutazione del sistema di asportazione del calore di decadimento prodotto dal nocciolo, tenendo conto solamente che la modalità di scambio termico non si porti alla condizione di film boiling, è eccessivamente conservativa e pertanto si dovranno effettuare degli studi specifici più dettagliati. In particolare, per valutare il calore di decadimento effettivamente prodotto dal nocciolo, riallocato sul fondo del vessel, e che deve essere asportato attraverso la superficie del vessel bisogna tener conto di:

- Presenza di materiali strutturali e non che si sono riallocati sul fondo del vessel assieme al combustibile; questi generano un aumento del volume della massa fusa ed un conseguente aumento della superficie di scambio attraverso il vessel (riduzione della densità media di potenza).
- Asportazione del calore prodotto dal corium anche grazie alla presenza del refrigerante al di sopra dello stesso;
- Limitato quantitativo di nocciolo che può effettivamente fondere a seguito dell'ipotetico evento incidentale.

STRATEGIA CONGIUNTA DI SISTEMI CRDM

Per quanto riguarda la strategia adottata per i sistemi di movimentazione delle barre di controllo, una soluzione comune a tutti i progetti non si è potuta individuare. La soluzione più comunemente adottata presenta un sistema di movimentazione idraulico (si fa eccezione per il sistema CRDM dei reattori giapponesi che al fine di poter essere impiegati in campo navale, richiedono sistemi di spegnimento rapido del reattore con caratteristiche particolari) gestito attraverso opportuni circuiti costituiti da pompe e valvole, anche se ciascuna soluzione adotta design diversi per quanto riguarda l'architettura del sistema vero e proprio. Adottare una strategia analoga per più soluzioni consentirebbe di avere maggiore conoscenza della stessa e quindi uno standard a livello internazionale.

Per quanto risulta dall'analisi effettuata, l'utilizzo di reattori di piccola taglia, in particolare per alcuni mercati di "nicchia", può risultare l'unica soluzione applicabile per produrre energia elettrica da fonte nucleare. La diffusione che questi impianti potrebbero avere rende necessario adottare strategie non tradizionali, in particolare per quanto riguarda il ciclo del combustibile. Uno studio di ottimizzazione relativamente alla fisica del reattore può consentire di ottenere burn up elevati e cicli "once-through" del combustibile.

Risulta pertanto un requisito importante poter effettuare operazioni di refueling contemporaneamente su tutto il nocciolo cosicché l'azienda costruttrice dell'impianto possa essere essa stessa ad occuparsi della gestione del combustibile esaurito. In particolare, una volta che il combustibile esaurito viene estratto dal nocciolo e lasciato per un opportuno periodo nelle apposite piscine predisposte per avere una riduzione della potenza di decadimento prodotta dal nocciolo, il combustibile viene prelevato e l'azienda che si occupa dell'esercizio dell'impianto non prende parte ai processi relativi al back-end del ciclo del combustibile. In questo modo si ottengono garanzie maggiori per quanto riguarda la non proliferazione e competenze più specifiche dell'azienda costruttrice che dovrà continuamente gestire tutto il combustibile esaurito prodotto dagli impianti di sua competenza.

Bibliografia

1. **Advanced marine reactor MRX and its application for electricity and heat co-generation** [Rivista] / aut. T.Ishida M.Ochiai, T.Hoshi.
2. **CAREM: an innovative-integrated PWR** [Rapporto] / aut. R.Mazzi. - August 2005.
3. **Design of advanced integral-type marine reactor, MRX** [Articolo] / aut. T.Kusunoki N.Odano, T.Yoritsune, T.Ishida,T.Hoshi, K.Sako // Nuclear Engineering and Design. - 2000. - 201 (2000) 155–175.
4. **IRIS** [Rapporto] / aut. Carelli Mario D.. - November 2003.
5. **Passive Safe Small Reactor for Distributed Energy Supply System Sited in Water Filled Pit at Seaside** [Rapporto] / aut. T. Ishida S. Imayoshi. - 2003.
6. **Safety design features of the CAREM** [Rivista] / aut. CNEA.
7. **Safety evaluation of the inherent and passive safety features of the smart design** [Articolo] / aut. K.H. Bae H.C. Kim, M.H. Chang, S.K. Sim // Annals of Nuclear Energy. - 2001.
8. **Safety evaluation of the inherent and passive safety features of the smart design** [Rapporto] / aut. Kyoo Hwan Bae Hee Cheol Kim, Moon Hee Chang, Suk Ku Sim. - 2001.
9. **Small floating nuclear power plants with ABV reactors for electric power generation, heat production and sea water desalination** [Rapporto] / aut. Kostin V.I. O.B. Samoilov, V.N. Vavilkin, Yu.K. Panov, Yu.D. Baranaev, A.A. Pekanov. - November 2004.
10. **SMART behavior under over-pressurizing accident conditions** [Articolo] / aut. M.H. Chang S.K. Sim, D.J. Lee // Nuclear Engineering and Design. - 2000.
11. **Steam generator of the International Reactor Innovative and Secure** [Rapporto] / aut. L.Cinotti M.Bruzzzone, N.Meda, G.Corsini, C.V.Lombardi, M.Ricotti, L.E.Conway. - April 2002.
12. **TECDOC-1444** [Rapporto] / aut. IAEA. - June 2005.
13. **TECDOC-626** [Rapporto] / aut. IAEA. - September 1991
14. **TECDOC-1451** [Rapporto] / aut. IAEA. - May 2005.
15. **TECDOC-1524** [Rapporto] / aut. IAEA. - January 2007.
16. **The design and safety features of the IRIS reactor** [Rapporto] / aut. M. D. Carelli et al.. - April 2003.